Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 33, No. 5: 1999-2007/ September, 2013
DOI: http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2013.33.5.1999

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

Transportation Engineering **교통공학**

보다 현실적인 차두시간 행태 구현을 위한 2차로 차량추종모형 개발

윤병조*
Yoon, Byoung Jo*

Development of Two-Lane Car-Following Model to Generate More Realistic Headway Behavior

ABSTRACT

The key characteristics of two-lane-and-two-way traffic flow are platoon and overtaking caused by low-speed vehicle such as truck. In order to develop two-way traffic flow model comprised of CF(car-following) and overtaking model, it is essential to develop a car-following model which is suitable to two-way traffic flow. Short distance between vehicles is caused when a high-speed vehicle tailgates and overtakes foregoing low-speed vehicle on two-way road system. And a vehicle following low-speed vehicle decides to overtake the front low-speed vehicle using suitable space within the headway distribution of opposite traffic flow. For this reason, a two-way CF model should describes not only running within short gap but also headway distribution. Additionally considering domestic two-way-road size, there is a on-going need for large-network simulation, but there are few studies for two-way CF model. In this paper, a two-way CA model is developed, which explains two-way CF behavior more realistic and can be applied for large road network. The experimental results show that the developed model mimics stop-and-go phenomenon, one of features of congested traffic flow, and efficiently generates the distribution of headway. When the CF model is integrated with overtaking model, it is, therefore, expected that two-way traffic flow can be explained more realistically than before.

Key words : Two-lane highway, Car-Following Model, Cellular Automata, Short Front Space, Headway Behavior

초 록

2차로 양방향 도로(이하 2차로 도로)의 주요한 특징은 화물차량 등의 저속차량으로 인하여 발생하는 차량군과 차량추월 행태이다. 차량추종과 차량추월모형이 결합된 2차로 도로 교통류 모형을 개발하기 위해서는 2차로 도로에 적합한 차량추종모형의 개발이 필수적이다. 2차로 도로에서 고속차량은 저속차량의 후미에서 차량추종을 수행함과 더불어 추월을 수행하게 되며, 이 과정에서 짧은 차간거리가 발생하게 된다. 또한 저속차량을 추종하는 차량은 대향교통류의 차두시간분포 내에서 적정 공간을 이용하여 차량추월을 결정하게 된다. 따라서 2차로 차량추종모형은 짧은 차간거리에서 차량주행과 더불어 차두시간분포를 설명해야 한다. 추가적으로 국내의 2차로 도로규모를 고려하면 대규모 도로망을 모의실험할 수 있는 모형이 필요한 실정이다. 국내의 경우, 2차로 차량추종모형에 대한 연구는 거의 보고되고 있지 않다. 본 연구에서는 대규모 가로망에 적용이 가능하면서 2차로 도로의 차량추종행태를 보다 현실적으로 구현할 수 있는 모형을 개발하였다. 개발된 모형의 실험적 평가 결과, 혼잡 교통류의 특성 중 하나인 가다서다(stop-and-go) 현상과 차두시간분포를 효과적으로 설명하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 제시된 차량추종모형이 차량추월모형과 결합된 경우, 보다 현실적으로 2차로 도로 교통류를 설명할 수 있을 것으로 판단된다.

검색어 : 2차로 도로, 차량추종모형, Cellular Automata, 짧은 전방공간, 차두시간 특성

* 정회원·교신저자·인천대학교 도시과학대학 도시환경공학부 (**Corresponding Author**·Incheon National University·bjyoon63@incheon.ac.kr)

Received September 17, 2012/ **revised** November 27, 2012/ **accepted** March 18, 2013

Copyright ⓒ 2013 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

국내 양방향 2차로 도로(이하 2차로 도로)의 총 규모는 34,254km로서 전체 도로망(42,609km, 고속도로 제외)의 약 80% 이상을 차지하고 있다. 그러나 2차로 도로 교통상태를 분석하기 위한 시뮬레이터는 미국에서 개발된 TWOPASS의 Parameter를 조정하여 이용하고 있는 수준이며, 국내 2차로 교통환경에 적합한 독자적인 시뮬레이터는 보고되고 있지 않다. 국내의 독자적 기술로 개발된 2차로 도로 시뮬레이터의 부재에 대한 주요한 원인 중 하나는 2차로 도로 차량추종모형의 부재를 들 수 있다.

따라서 국내 2차로 도로의 규모를 고려할 때, 대규모 도로망의 미시적 모의실험을 위해서는 2차로 도로 차량추종모형의 개발이 필수적이나, 이에 대한 국내 연구는 매우 미흡한 실정이다. 또한 상용화된 미시적 차량 시뮬레이터(CORSIM, VISSIM, PARAMICS, CUBIC 등)는 2차로 도로을 구현할 수 없는 한계가 있으며, 국내의 2차로 도로환경에 적합하지 않는 단점이 있다. 이와 같이 2차로 도로 시뮬레이터의 개발과 교통공학적 분석을 위해서 2차로 도로 차량모형개발은 학술적 측면에서 시급한 연구분야라 판단된다.

2차로 도로의 교통류 특성은(저속차량으로 인한) 차량군과 추월행태이다. 차량군은 차량군 서두에서 주행하는 저속차량의 속도에 따라 다양한 형태를 가지게 된다. 그리고 저속차량을 추월하는 차량은 역방향 교통류의 차두시간분포내에서 추월가능 차두시간을 선택하고, 추월을 수행하게 된다. 이러한 과정에서(즉, 저속차량을 추종하는 차량간의 차량추종과정과 추월 후 해당차로로 복귀하는 과정) 차량의 주행속도에 비하여 짧은 차간거리가 발생하게 된다. 따라서 2차로 차량추종모형은 저속차량 추종 및 추월완료시 짧은 차간거리로 인한 차두시간분포를 설명해야 한다. 추가적으로 국내의 이차로 도로 규모를 고려할 때, 2차로 도로 차량추종모형을 대규모 지역간 도로망에 적용하기 위해서는 모형의 개발시 연산속도와 더불어 메모리를 효과적으로 처리할 수 있도록 고려되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 통계물리학적 이론과 이산적 시공간을 기반으로 대규모 도로망에 적용이 가능한 Cellular Automata(이하 CA)를 이용한 2차로 CA 차량추종모형을 개발하고, 그 적용가능성을 실험적으로 분석하였다. 개발된 차량추종모형은 미시적 측면에서 기존 CA차량추종모형의 단점이었던 짧은 차간거리에서 급격한 속도감속 문제점을 효과적으로 극복함으로써 차두시간분포를 다양하게 구현함과 동시에 가다서다 현상을 설명하였으며, 거시적 측면에서 거시적 교통류관계를 합리적으로 설명하였다.

2. 기존연구 고찰

전통적으로 차량추종모형은 GM계열(GM family)모형, 안전거리(safety distance) 모형, 충돌회피(collision avoidance)모형 등을 들 수 있다. 이들 모형은 운전자의 반응시간과 관련된 민감도, 그리고 차량의 가감속도를 입력변수로 모형화되었다. 그러나 기존의 차량모형은 용량감소(capacity drop), 자연발생적 혼잡(spontaneous jam), 혼잡교통류 상태에서의 가다서다(stop-and-go) 교통류, 2차로 도로의 차량군(platoon)을 설명하는데 한계를 가지고 있으며, 모형의 시공간 구조는 연속적임으로 실수형 변수를 이용하여 연산을 수행하게 된다(Chang et al. 2005). 따라서 대규모 도로망의 모의실험 수행시 연산수행속도가 실시간 보다 느리며 많은 메모리가 필요한 한계를 가지고 있기 때문에 기존 모형을 이용한 대규모 도로망 모의실험은 보고되고 있지 않은 실정이다(Chang et al. 2004, 2005). 따라서 본 연구는 CA이론을 기반으로 2차로 도로 차량추종모형을 개발하는데 그 목적이 있음으로 기존연구는 CA차량추종모형에 초점을 두도록 한다.

대규모 도로망 모의실험이라는 1차적 목표를 달성하고 혼잡교통류의 특성인 가다서다 현상을 설명하기 위하여, 거시적으로는 통계물리학을 기반으로 하고 미시적으로는 이산적 시공간을 기반으로 하는 Cellular Autoamta이론을 이용한 CA차량추종모형(Nagel and Schreckenberg, 1992)이 개발되었다. 이후 CA모형은 미국의 TRANSIMS 프로젝트를 통해 대규모 가로망을 미시적으로 모의실험하는데 성공하였으며, 현재는 독일 아우토반 고속도로를 실시간보다 빠른 속도로 모의실험하고, 그 분석결과를 이용하여 고속도로 장래 소통정보를 제공하는 수준까지 발전하였다(OLSIM; www.autobahn.nrw.de).

CA 차량추종모형은 1990년 초반에 NaSch모형(Nagel and Schereckenberg, 1992)이 소개된 이후, T^2모형(Takayasu and Takayasu, 1993), BJM 모형(Benjamin et al., 1996), Krauss모형(Krauss, 1997), 기존 NaSch모형을 수정한 VDR(Velocity Depending Randomization)모형(Schadschneider and Schre-ckenberg, 1997), MRO(Multi Regime Oriented) 모형(Chang et al., 2005) 등의 다양한 모형이 개발되었으며, 특히 MRO모형은 한국도로공사 고속도로의 실시간 장래 교통사고영향분석에 적용되었다(Chang et al., 2008).

국내의 경우, NaSch모형을 기반으로 몇몇 연구가 수행되었다. Choen and Rho(2001)은 고속도로 교통사고 분석에 NaSch모형을 적용하여 실험적으로 분석하였으며, Cho et al. (2001)는 고속도로 시뮬레이터를 개발하였다. Chang and Lee (2003)는 NaSch모형을 기반으로 차량의 정지과정을 고려하여 단속류 차량추종모형을 개발하고, 개발된 모형을 단기 통행시간예측을 위한 모의실험에 적용하였다. Chang et al. (2004)는 고속도로의 다양한 교통류 행태를 구현할 수 있는 CA기반 차량추종모형을 개발하였으며, 고속도로 교통사고영향분석을 위한 시뮬레이터로 개발되어 의사결정시스템

으로 적용되었다(Chang et al. 2008, Shah et al. 2008). Yoon (2009)는 2차로 고속도로의 차로변경모형을 개발하고 차로이용률의 다양한 형태를 구현할 수 있음을 보였으며, Yoon (2011)는 양방향 이차로 도로에 적용하기 위한 CA기반 차량모형을 개발하고 이를 실험적으로 분석하였다. 이와 같이 기존의 CA기반 차량추종모형은 대부분 고속도로 적용을 위하여 개발되어 왔으며, 저속차량으로 인한 차량군과 차량추월 행태를 보이는 2차로 도로에 적용하기 위한 차량추종모형의 개발은 미흡한 실정이다.

3. 차량추종모형의 개발

모형의 개발은 기존 CA차량추종모형의 Frame을 통하여 장·단점을 분석하고, 2차로 도로 적용을 위한 차량추종모형의 개발을 기술하도록 한다.

3.1 기존 차량추종모형의 장·단점

CA차량추종모형은 교통류를 하나의 Complex system으로 보고 통계물리학(statistical physics)을 기반으로 개발되었으며, 차량추종모형은 시스템을 구성하는 단위객체를 구현하는 수단이라 할 수 있다. 따라서 CA차량추종모형은 교통류 시스템을 구성하는 단위객체로서 간략하게 그 행태를 설명하게 되며, 통계물리학적으로 전체적인 시스템의 행태 즉, 거시적 교통류관계를 설명하게 된다(Chang et al., 2004).

Fig. 1은 CA모형의 공간구조 및 차량의 표현방식을 보여주고 있다. 연속적 도로공간은 단위 셀로 구분되며, 차량은 셀을 점유하면서 jumpping하는 방식으로 이동하게 된다. 셀은 차량의 점유와 비점유로 구분되며, 차량속도(셀/time-step)는 time-step 당 이동하는 셀의 개수로 표현된다.

이러한 CA모형의 이산적 시공간 개념은 (연속적 시공간을 이용하는 기존 차량추종모형이 실수연산을 수행하는데 비하여) 시공간과 차량존재 그리고 속도를 정수로 표현한다. 엄밀하게 말하자면, 연속적 시공간을 이용하는 기존 차량추종모형의 시간은 time-step이 실수 단위로 구분되기는 하나 구분된 time-step은 결국 이산적 시간이며 이는 CA모형과 동일하다. 연속적 공간을 이용하는 모형은 차량의 속도와 위치를 실수로 연산하는 반면, CA모형은 이산적 공간을 이용하게 됨으로 차량의 속도와 위치를 정수(일반적으로 차량 1대의 점유공간인 셀의 정수배)로 연산하게 된다. 이러한

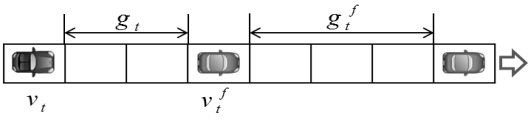

Fig. 1. Structure of Discrete Space

이산적 시공간을 이용한 시간, 공간, 그리고 차량의 속도 정수화는 CA모형의 단점이면서 큰 장점이다. 이산적 시공간에서 미시적인 차량의 행태를 정밀하게 설명하기는 불가능하지만, 연산수행속도와 메모리 문제를 해결할 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점은 CA모형을 이용하여 대규모 도로망 모의실험을 가능하게 하였다(Beckman et al, 1997; Chang et al., 2008).

일반적으로 CA차량추종모형은 Eq.(1)에 의하여 속도를 결정론적으로 갱신한 후 Noise확률변수(p_n)을 적용하여 개별차량의 속도를 확률적으로 감속시키게 된다. 결정론적 속도의 갱신은 $g > v_t$인 경우 가속하고 $g \le v_t$인 경우 g의 속도로 감속 또는 등속한다. 그리고 차량의 속도는 $v_{\max}$을 초과할 수 없다.

$$v_{t+1} = \min[v_t + 1, g, v_{\max}] \quad (1)$$

v_t: 시간(t)에서 차량의 속도(셀/초)
v_{t+1}: 시간($t+1$)에서 차량의 속도(셀/초)
$v_{\max}$: 차량의 최대속도(셀/초)
g: 선행차량과의 비 점유 셀 개수(셀)

이상의 CA 차량추종모형의 속도갱신 규칙(speed updating rule)은 간략하지만 거시적 교통류관계를 우수하게 설명한다. 그러나 속도갱신은 미시적 측면에서 단점을 가지고 있다. $g < v_t$인 경우 즉, 짧은 차간거리 상태에서 결정론적 속도는 $v_{t+1} = g$로 갱신되며, 일종의 충돌회피 모형의 특성을 가진다. 따라서 2차로 도로의 차량군과 차량추월을 미시적 행태로 설명하는데 한계를 가진다. 첫째, 저속차량을 추종하는 차량은 모형의 특성상 $g < v_t$인 경우를 지속적으로 경험하게 되고 이로 인하여 선행 저속차량보다 낮은 속도로 주행하게 되는 경우가 지속적으로 반복된다. 그러나 저속차량을 추종하는 차량은 일반적으로 저속차량의 속도를 유지하면서 추종을 수행한다. 둘째, 저속차량을 추월하고 해당차로로의 복귀시 추월차량은 일반적으로 저속차량의 선두로 복귀하게 되며, 이 경우 저속차량과 추월을 완료하고 해당차로로 복귀한 차량은 $g < v_t$에서 발생하는 속도 급감속의 문제를 피할 수 없다. 셋째, 차량의 결정론적 속도 갱신은 전적으로 g에 의존하게 됨으로 속도 $v_i > 0$에서 차두시간(h_i, 초)은 Eq.(2)와 같이 산정됨으로 1.0초 이하의 경우가 발생하지 않는다. 반면 실제 교통류의 차두시간분포는 1.0초 이하가 나타나게 된다. 이상의 3가지 단점으로 인하여 기존 CA차량추종모형은 직접적으로 2차로 도로에 적용하지 못하는 한계를 가진다. 따라서 본 연구에서는 이상의 단점을 극복함으로써 2차로 CA차량추종모형을 개발하였다.

$$h_i = [g+1]/v_i \quad (2)$$

3.2 2차로도로 차량추종모형개발

본 연구에서 개발된 CA차량추종모형은 NaSch모형(Nagel and Schereckenberg, 1992)을 근간으로 개발되었다. NaSch모형의 Framework를 간략히 설명하면 ①전방 gap 탐색, ②(확률적 속도감소를 통한)속도갱신, ③차량이동의 3단계로 규칙으로 구성되며, 모든 차량에 대하여 병렬적 연산을 수행한다.

일반적으로 운전자들은 차량의 주행속도에 비하여 차간거리가 낮더라도 지속적으로 주행하는 특성을 지닌다. 이것은 경험적으로 선행차량의 속도를 예측하고 주행을 수행하기 때문이다. 따라서 선두차량의 급작스런 돌발상황 발생시 연쇄추돌과 같은 교통사고를 피하기는 어렵다. 그럼으로 운전자는 기존 CA모형에서 적용하는 차간거리(g)보다 긴 공간을 인식하고 주행한다고 할 수 있다. 본 연구에서는 이와 같이 물리적 공간으로서 g가 아닌 운전자가 인지하는 거리로서 확장된 차간거리(expanded gap, g_e)를 도입함으로써 기존 모형에 비하여 보다 현실적으로 차간거리를 설명하도록 개발하였다. Fig. 1은 CA모형의 이산적 공간구조를 보여주고 있으며, g_e는 선행차량의 속도(v_t^f), 선행차량의 gap(g_t^f) 그리고 결정론적으로 확장된 g_e의 감소확률을 이용하여 계산된다. 계산된 g_e는 기존 NaSch모형의 g역할을 수행하게 된다.

개발된 CA차량추종모형은 ①전방차량의 주행상태를 고려한 expanded gap(g_e)의 산정, ②(확률적 속도감소를 통한)속도갱신, ③차량이동의 3단계로 규칙으로 구성되며, 다음과 같다.

3.2.1 Expanded Gap(g_e) 산정

If $v_t > 0 \text{ and } v_t > g_t$ then

Randomization

If $r < p_e$ then

$$g_e = g_t + \max[0, \min[v_t^f,\ g_t^f - 1,\ v_{\max}^f - 1] - 1] \tag{3}$$

Else

$$g_e = g_t + \max[0, \min[v_t^f,\ g_t^f - 1,\ v_{\max}^f - 1]] \tag{4}$$

Else

$$g_e = g_t \tag{5}$$

g_t: 시간(t)에서 추종차량과 선행차량간의 비 점유공간(셀)
v_t^f: 선행차량(f)의 시간(t)에서 속도(셀/초)
g_t^f: 선행차량(f)의 시간(t)에서 전방 gap(셀)
$v_{\max}^f$: 선행차량(f)의 최대속도(셀/초)
p_e: g_e 감소확률(0.0~1.0)
r: 난수값(0.0~1.0)

3.2.2 속도 갱신 with Randomization

If $r < p_n$ then

$$v_{t+1} = \max[0, \min[v_t, g_e - 1,\ v_{\max} - 1]] \tag{6}$$

Else

$$v_{t+1} = \min[v_t + 1,\ g_e,\ v_{\max}] \tag{7}$$

v_t: 시간(t)에서 차량의 속도(셀/초)
v_{t+1}: 시간($t+1$)에서 차량의 속도(셀/초)
$v_{\max}$: 차량의 최대속도(셀/초)
p_n: v_{t+1} 감속확률(0.0~1.0)
r: 난수값(0.0~1.0)

3.2.3 차량이동

$$x_{t+1} = x_t + v_{t+1} \tag{8}$$

x_t: 시간(t)에서 차량의 위치
x_{t+1}: 시간($t+1$)에서 차량의 위치

개발된 차량추종모형에서 속도갱신과 차량이동은 기존의 NaSch모형과 동일하다. 따라서 Expanded gap rule(이하 EGR)에 초점을 맞추어 모형을 기술하도록 한다. EGR에서 결정론적 g_e는 시각(t)의 주어진 조건에서 선행차량이 갱신할 수 있는 시각(t+1)의 최소 속도와 해당차량 g_t의 합이다. 이는 추종차량이 해당차량의 g_t에 선행차량의 갱신되는 최소속도 만큼 비 점유 공간을 연장할 수 있음을 의미한다. 그리고 추종 운전자는 갱신되는 시각(t+1)의 최소 속도를 인지하는 과정에서 편차가 발생하게 된다. 이러한 편차는 g_e감소확률 변수인 p_e을 이용하여 고려하게 된다. 본 연구에서 제시된 g_e는 차량의 대수가 증가할수록 검색과 연산이 증가하게 된다. 따라서 $v_t > 0 \text{ and } v_t > g_t$인 경우에 한하여 EGR을 적용함으로써 연산증가를 최소화할 수 있다. 차량의 밀도(ρ, 0.0~1.0)가 임계밀도(ρ_c)보다 작은 경우 EGR을 적용하더라도 연산되는 차량의 대수가 적기 때문에 모형의 수행시간에 큰 영향을 미치지 않으며 많은 경우에 있어서 Eq.(5)가 적용된다. 그리고 $\rho > \rho_c$인 경우 혼잡으로 인한 정지차량이 다수 발생함으로 밀도가 혼잡밀도(ρ_{jam}=1.0)에 근접할 수 록 EGR의 Eq.(3)과 (4)에 의한 연산증가는 발생하지 않으며 Eq.(5)가 이를 대신하게 된다. 따라서 기존 CA차량추종모형의 1차적 목표인 대규모 도로망 모의실험 기능을 유지하게 된다.

4. 개발모형의 평가

4.1 모의실험 설계

개발모형은 모의실험을 기반으로 평가하도록 한다. 첫째, CA차

량추종모형의 1차적 목표인 거시적 교통류관계를 시스템과 지점으로 도출하여 개발모형의 거시적 교통류 관계[교통량-밀도($q-\rho$), 속도-밀도($s-\rho$)]에 대한 재현 정도를 평가하도록 한다. 둘째, 2차로 도로 교통류의 자연발생적 혼잡과 가다서다 현상을 차량궤적 시공도를 통하여 분석하도록 한다. 셋째, NaSch모형과 개발된 모형의 차두시간분포를 이용하여 차두시간 설명정도를 분석하도록 한다.

이상의 분석 목표를 달성하기 위한 모의실험은 무한 원형링크에서 수행하였으며, 단위 셀 길이(m)는 6.0으로 설정하였다. 그리고 시스템의 크기는 60km(10,000개 셀 = 60,000m/6m)이다. 기하구조는 평지 일차로 직선구간으로서 이상적 조건을 만족한다. 모형의 변수별 시나리오는 다음과 같다. 차량의 최대속도($v_{\max}$)=3이며, 기존 모형의 경우 99개 밀도 시나리오(0.01~0.99, 증가량 0.01), p_n=71개 시나리오(0.0~0.7, 증가량 0.1)로서 총 7,029(=99*71)개 시나리오, 개발 모형의 경우 기존 모형과 동일하나 p_e=11개 시나리오(0.0~1.0, 증가량 0.1)로서 총 77,319개(=99*71*11) 시나리오를 분석하였다.

4.2 개발모형의 평가결과

CA 차량추종모형은 교통류시스템내의 차량을 간략하게 모사하면서 교통류의 거시적 관계를 설명하도록 설계되었다. 따라서 차량추종모형은 거시적 교통류 관계를 설명해야 한다. Figs. 2 and 3은 NaSch모형과 개발모형의 p_n에 따른 거시적 관계[$q-\rho$, $s-\rho$] 관계를 각각 보여주고 있다. NaSch모형의 경우, p_n에 의하여 종형이지만 다양한 형태의 자유교통류 속도(v_{ff}, kph), 용량($q_c = J(\rho)$, $0.0 \le q_c \le 1.0$, 대/초), 용량상태의 속도(v_c, kph), 임계밀도(ρ_c, $0.0 \le \rho_c \le 1.0$)가 설명되고 있다. 개발모형의 경우도(NaSch모형과 동일한 p_n에 g_e을 고려하기 위하여 p_e=0.5인 조건임), p_n의 기능은 동일하게 유지되고 있다. 다만, p_e을 적용함으로써 NaSch모형의 g_t가 g_e로 확장되면서 v_{ff}와 q_c는 NaSch모형에 비하여 높게 나타나고 있다. p_n={0.1, 0.2, 0.3}에 대하여 세부적으로 살펴보면 NaSch모형의 경우 {v_{ff}, v_c, q_c}는 [{62.6, 52.8, 0.584}, {60.4, 48.4, 0.491}, {58.3, 44.8, 0.412}]이며, 개발모형은 {{62.7, 55.9, 0.615},{60.5, 51.4, 0.519},{58.4, 47.7, 0.436}}로 나타났다.

v_{ff}는 두 모형 모두 유사한 결과를 보였으며, 이는 ρ가 매우 낮은 상태임으로 개발모형의 g_e 적용을 위한 조건($v_t > 0$ and $v_t > g_t$)이 만족되는 경우가 거의 발생하지 않기 때문이며 합리적 결과로 판단된다. 따라서 v_{ff}는 Eq.(9)와 같이 기존모형과 동일하게 계산이 가능하다(Chang et al., 2004)

$$v_{ff} = 3.6 \cdot \{(1-p_n) \cdot v_{\max} + p_n \cdot (v_{\max} - 1)\} \quad (9)$$

반면, 용량상태의 속도(v_c)는 약 3kph 증가하고 있으며, 이는 ρ_c의 전후에서 EGR이 적용되기 때문이다.

v_c가 증가하면서 ρ_c는 각각 약 5.8% 증가하고 있다. 이는 EGR을 적용할 경우 NaSch모형의 p_n이 설명하는 q_c을 그 이상으로 상향조정할 수 있음을 의미한다. 이를 예로 들자면, NaSch모형의 경우

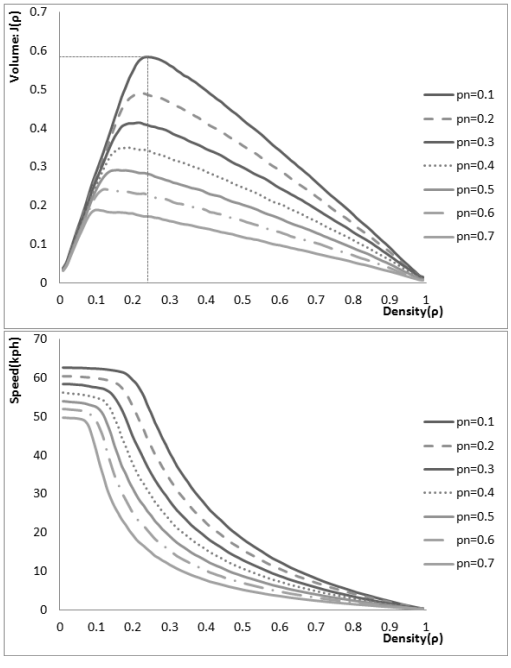

Fig. 2. Traffic Flow Relationships of NaSch Model

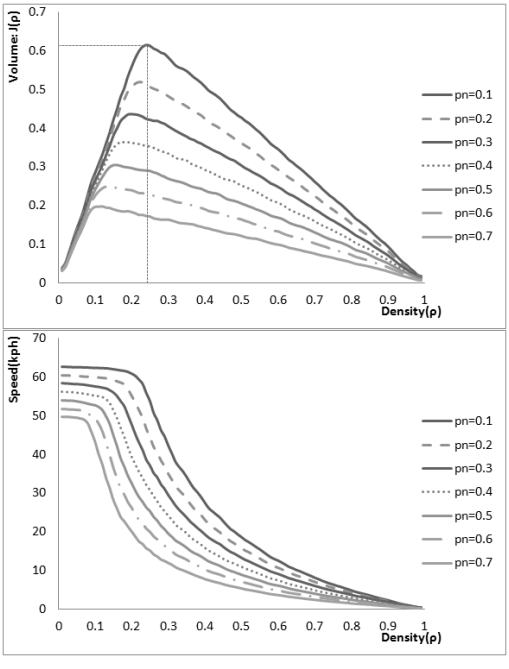

Fig. 3. Traffic Flow Relationships of Developed Model: $p_e = 0.5$

p_n=0.2인 경우 [v_{ff}, q_c]는 [60.4, 0.491]로 결정되지만, 개발모형의 경우 p_e을 조정하면 [60.5, 0.491]~ [60.5, 0.519]까지 조정이 가능하다. 즉, 자유속도 60kph에서 용량을 약 1,770~1,870승용차/시로 조정이 가능하다. 따라서 v_{ff}, v_c, q_c, ρ_c을 관측값을 이용하여

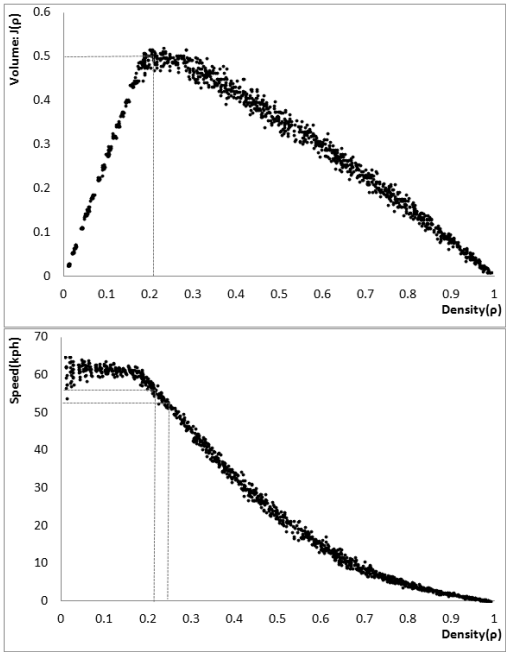

Fig. 4. Estimated Traffic Flow Relationships of NaSch Model

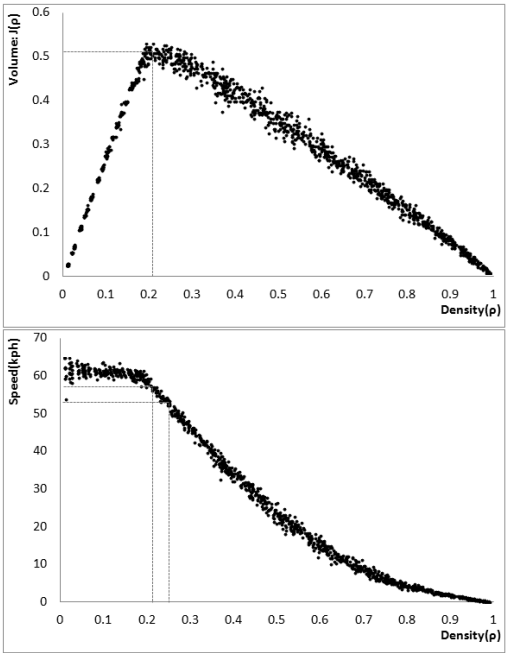

Fig. 5. Estimated Traffic Flow Relationships of Developed Model: $p_e = 0.5$

칼리브레이션함에 있어 장점을 갖는다고 판단되며, 기존 NaSch모형의 단점을 일정수준에서 극복하였다고 판단된다. 추가적으로 EGR을 적용하더라도 NaSch모형과 개발모형의 개별 p_n에서 ρ_c는 동일하다. 또한 $p_n = 0$즉 기여도가 0인 경우 임계밀도(ρ_c)는 $1/(v_{\max}+1)$이며, 두 모형은 동일한 거시적 관계를 보인다.

Fig. 4와 5는 두 모형의 미시적 행태 비교를 위해 선정된 지점(국부적인) 교통류의 거시적 관계를 보여주고 있다. $q_c \approx 0.5$(1,800 대/시)이며, NaSch모형의 p_n=0.19이며, 개발모형의 p_n=0.21, p_e =0.5로서 $\rho_c \approx 0.2$에서 $q_c \approx 0.5$(1,800 대/시)를 설명하고 있다.

Fig. 6은 NaSch모형과 개발모형의 자연발생적 혼잡(spontaneous jam)과 혼잡 발생이후 가다서다 현상을 차량 궤적(trajectory) 시공도를 이용하여 보여주고 있다(차량의 시공간 이동방향 ↘). 두 모형 모두 모의실험 초기단계에서 국부적 혼잡(jam)이 발생하고 있으며, 시간이 경과함에 따라서 국부적 혼잡은 성장/지속/소멸하고 있다. 따라서 개발모형은 NaSch모형의 장점인 자연발생적 혼잡발생, 혼잡 발생이후 혼잡의 성장과 소멸, 그리고 그 과정에서 발생하는 차량의 가다서다 현상을 동일하게 설명하는 것으로

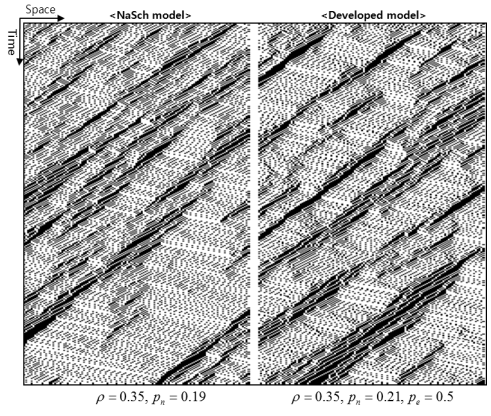

Fig. 6. Time-Space Vehicle Trajectory Under Unstable Traffic Flow State

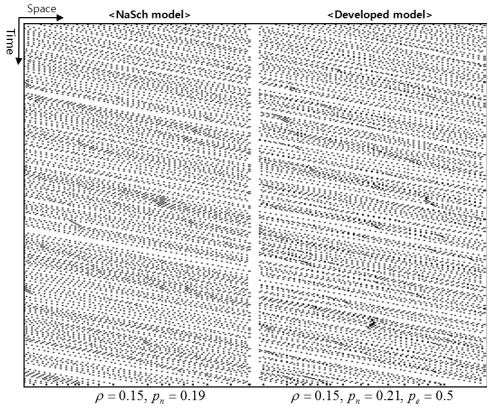

Fig. 7. Time-Space Vehicle Trajectory Under Stable Traffic Flow State

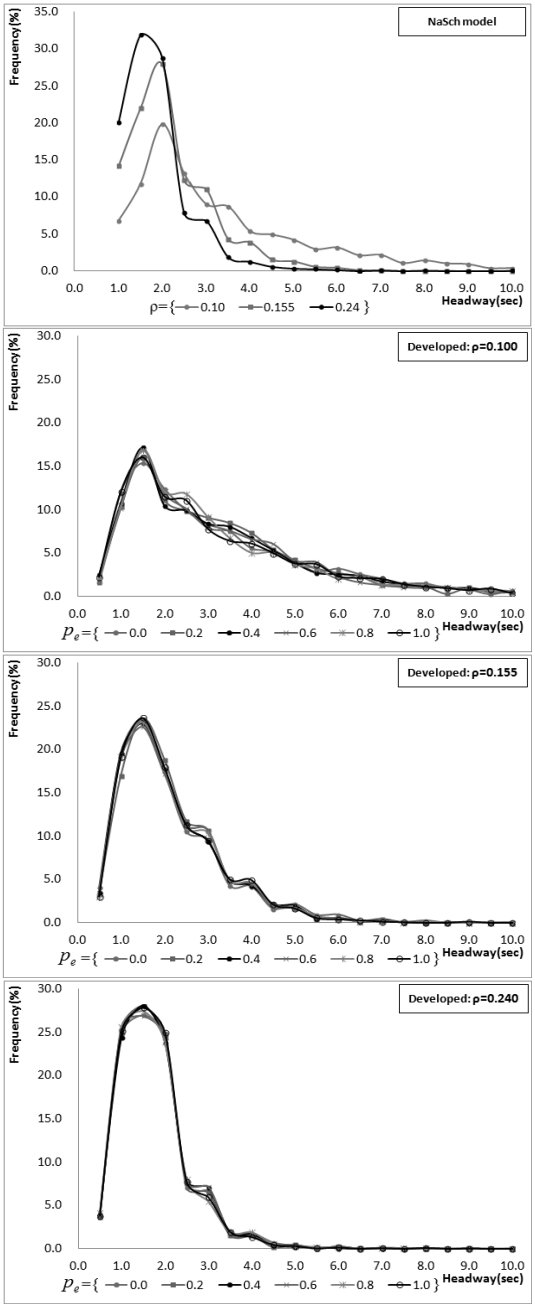

Fig. 8. Characteristics of Headway Distribution: NaSch Model vs. Developed Model

판단된다. 추가적으로 본 연구의 모의실험은 Closed boundary system에서 수행에서 수행되었음으로 wide-moving jam은 발생하지 않고 있다. 그러나 유입과 유출이 분리된 open boundary system에서 모의실험되었을 경우 혼잡은 wide-moving jam으로 성장하게 된다.

Fig. 7은 안정 교통류 상태($\rho < \rho_c$, $q \approx 0.4$)에서 차량의 궤적을 시공도로 보여주고 있다. NaSch모형의 차간거리는 개발모형에 비하여 보다 균일하나 나타나고 있으며, 개발모형에 비하여 차간거리는 길게 나타나고 있다. 이는 3.1에서 언급한 g_t의 한계이다. 반면 개발모형은 NaSch모형의 단점을 어느 정도 완화시키면서 차량의 집분산을 NaSch모형에 비하여 보다 합리적으로 설명하고 있다.

Fig. 8은 ρ={0.10, 0.155, 0.240}에서 두 모형의 차두시간분포를 보여주고 있다(계급의 최소/최대값(초)은 각각 0.5와 10.0이며, 계급의 길이는 0.5임, $h_x < h_i \leq h_x + 0.5$). 이론적으로 eq.(2)에 의하여 NaSch모형의 최소 차두시간(h)는 $g_t \geq v_t$ 그리고 $v_t = v_{t+1}$일 경우 h는 1.0초 이하가 발생할 수 없으며, $v_t = v_{t+1} = v_{\max}$의 조건에서 $h \approx 1.33$초이다. 반면 개발모형의 경우 $g_t \leq v_t$, $g_e > v_t$ 그리고 $v_t = v_{t+1}$인 조건에서 h는 1.0이하가 발생해야 한다. ρ가 증가함에 따라 차두시간 분포는 0.0초 방향을 향하여 좌측편포로 편중[짧은 h의 빈도 증가, 긴 h의 빈도 감소]되고 있다. 그러나 NaSch모형의 경우 $h \approx 1.33$초 이하를 설명할 수 없으며, ρ가 증가하여도 h=1.33의 증가보다는 h=1.67과 2.0의 빈도가 상대적으로 높게 나타나고 있다. 이는 NaSch모형의 경우 미시적 측면에서 교통류의 행태를 왜곡할 수 있음을 보여준다.

반면, 개발모형의 경우 (EGR의 역할을 통해) 차두시간분포는 1.0초 이하를 설명하고 있으며, ρ가 증가함에 따라 전형적인 차두시간분포의 특징[짧은 h의 빈도 증가, 긴 h의 빈도 감소]을 보여주고 있다. $1.0 < h_i \leq 1.5$와 $2.0 < h_i \leq 2.5$의 상대적인 빈도의 차이는 크게 증가하지 않으면서 $1.5 < h_i \leq 2.0$의 빈도가 증가하고 있다. 그리고 EGR의 확률적 변수인 p_e을 조정하면 차두시간분포를 일정수준까지 미세하게 설명할 수 있음을 보여준다. 결국, 동일한 ρ_c에서 동일한 q_c을 설명하게 될 경우, $h_i \leq 2.5$인 빈도가 NaSch모형에 비하여 개발모형이 높게 나타나며, 이는 개발모형의 차량 집분산 정도가 NaSch모형에 비하여 크게 나타남을 의미한다. 따라서 본 연구에서 개발된 차량추종모형을 2차로 도로의 추월모형과 결합할 경우 추월을 시도하는 운전자는 NaSch모형에 비하여 상대적으로 많은 추월기회를 확보할 수 있게 되며, 이는 EGR의 확률적 변수인 p_e을 이용하여 일정수준까지 모형정산이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론 및 향후연구

서두에서 언급하였다 시피 국내의 2차로 양방향 도로의 규모에도 불구하고 2차로 양방향 차량모형에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 2차로 도로 모의실험기의 개발에 핵심적인 요소인 2차로 도로 차량추종모형을 개발하였다. 개발된 차량추종모형은 기존 CA차량추종모형의 한계를 효과적으로 극복하면서

보다 현실적으로 2차로 도로 교통류의 특성을 설명하였으며, 그 적용가능성을 모의실험을 통하여 설명하였다. 본 연구의 결론 및 향후연구는 다음과 같다.

첫째, 기존의 NaSch모형에 운전자의 인지 차간거리인 g_e을 EGR 규칙과 확률변수(p_e)을 이용하여 효과적으로 설명하였다. EGR은 거시적 교통류 측면에서 기존 CA차량추종모형이 가지고 있던 모형정산의 단점을 (현실적인 이차로 도로의 거시적 관계를 고려하면) 사실상 극복할 것으로 판단된다.

둘째, EGR이 결합된 개발모형은 NaSch모형의 장점인 국부적인 혼잡의 자연발생, 국부적 혼잡 발생이후 wide-moving jam으로의 혼잡 성장, 그리고 국부적인 혼잡의 소멸 과정에서 발생하는 차량의 가다서다 현상을 동일하게 설명하였다. 따라서 기존 CA차량모형의 장점을 유지할 수 있었다.

셋째, 기존 CA모형은 거시적 교통류시스템의 거시적 관계와 지점(local)에서 거시적 교통류관계를 효과적으로 재현하지만, 미시적 교통류 특성인 차두시간분포를 비현실적으로 설명하였다. 반면 EGR이 결합된 개발 차량추종모형은 보다 현실적으로 차두시간분포를 설명하였으며, 이는 2차로 도로의 추월행태와 밀접한 관련이 있다.

넷째, CA차량모형은 대규모 가로망을 모의실험하기 위하여 개발되었다. 따라서 차량모형의 보다 현실적인 고려로 대규모 도로망을 모의실험할 수 없다면 CA모형의 근본적인 목표를 상실하게 된다. 본 연구에서 개발된 차량추종모형은 기존 CA차량추종모형과 동일한 시공간을 고려하였다. 그리고 결합된 EGR의 경우 대규모 도로망의 연산을 고려하여 개발되었다. 따라서 대규모 도로망 적용이라는 CA차량모형의 일차적인 기능을 유지할 수 있었다.

본 연구에서는 2차로 도로 적용을 위한 차량추종모형을 개발하였다. 그러나 2차로 도로의 차량군과 추월행태를 설명하기 위해서는 추월모형과 결합되어야 한다. 따라서 향후 연구는 다음과 같다.

첫째, 현장조사 값을 기반으로 2차로 교통류의 특성[차두간격 분포, 자유교통류 속도, 임계밀도, 임계속도, 가다서다 교통류의 특성, 오르막구간과 내리막구간에서 차량의 감속특성 등]에 대한 차량추종모형의 정산이 수행되어야 하며, 이에 대한 지속적인 연구가 필요하다. 개별 파라미터의 정산은 비 혼잡교통류와 혼잡교통류로 구분하여 수행될 수 있다. 비 혼잡교통류($\rho \le \rho_c$)는 ①셀 길이, 최대속도($v_{\max}$), 무작위적 감속확률(p_n), EGR변수인 p_e를 정산하여 비 혼잡교통류 상태에서 용량(q_c), 임계밀도(ρ_c), 그리고 차두시간분포를 실제 측정값과 유사하도록 정산하여야 하며, ②정산시 차량군의 차두시간분포를 설명할 수 있도록 정산해야 한다. 그리고 ③오르막 구간과 내리막구간에서 용량과 임계밀도, 일반차량과 중차량의 가-감속 곡선을 설명하도록 변수값을 조정할 수 있을 것으로 판단된다. 혼잡교통류($\rho_c < \rho \le 1.0$)는 ①혼잡시 혼잡밀도를 최우선으로 정산한 후, ②밀도별 $v_{\max}$, p_n, 그리고 p_e을 정산하여 밀도별 속도를 설명할 수 있도록 정산할 수 있으며, 이때 발생하는 ③가다서다 현상의 주행시간과 정지시간 분포를 정산해야 한다.

둘째, 선행연구(Yoon, 2011)에서 개발된 2차로 도로 추월모형과 결합하여 차량추종과 추월을 동시에 설명하는 2차로 차량모형을 개발하고, 차량추종모형과 추월모형의 정산을 통하여 국내 2차로 도로에 적합한 모형을 개발하여야 할 것이며, 이를 위해서는 지속적인 향후 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 인천대학교 2012년도 자체연구비(국제공동연구비) 지원에 의하여 연구되었음

References

ARRB (1985). *Technical manual ATM 10A; A model for simulating traffic on two-lane rural roads: User guide and manual for TRARR version 3.0*.

Barlovic, R., Santen, L., Schadschneider, A. and Schreckenberg, M. (1997). "Meta-stable states in CA models for traffic flow." *Traffic And Granular Flow 97*, Springer, pp. 335-340.

Beckman, R. J. et al. (1997). *TRANSIMS Dallas/Fort Worth case study report,* Los Alamos Unclassified Report LA-UR to be released, Los Alamos National Laboratory, TSA-Division, Los Alamos NM 87545, USA.

Chang, H. and Lee, S. (2003). "A study on link travel time prediction by short term simulation based on CA." *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 21, No. 1, pp. 91-102 (in Korean).

Chang, H., Baek, S. and Park, J. (2004). "A study on stochastic wave propagation model to generate various uninterrupted traffic flows." *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 22, No. 4, pp. 147-158 (in Korean).

Chang, H., Baek, S., Namkoong, J. and Yoon, B. (2005). "Some findings of CA models to generate various freeway traffic flows with additional rules." *Journal of EASTS*, Vol. 6, pp. 1368-1381.

Chang, H., Baek, S., Kim, H., Shah, A. A., Lee, J. D. and Mahalik, N. P. (2008). "Development of distributed real-time decision support system for traffic management centers using microscopic CA model." *Iranian Journal of Science & Technology*, Transaction B, Engineering, Vol. 31, No. B2, pp. 155-166.

Cho, J., Kim, J., Kho, 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).

Choen, S. and Rho, 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).

Chopard, B., Dupuis, A. and Luthi, P. (1997). "A cellular automata model for urban traffic and its application to the city of geneva." *Traffic And Granular Flow 97*, Springer, pp. 153-168.

Goldblatt, R. (1981). *Review of existing two-lane, two-way rural road computer simulation models*.

May, A. D., Botha, J. L. and Bryant, R. S. (1980). *A decision-making framework for evaluation of climbing lanes on two-lane, two-way rural roads*, Institute of Transportation Studies, University of California, FHWA & CALTRANS.

Nagel, K. and Schreckenberg, M. (1992). "A cellular automaton model for freeway traffic." *Journal of Physics Issue 2*, pp. 2221-2229.

Nagel, K., Stretz, P., Pieck, M., Leckey, S., Donnelly, R. and Barrett, C. L. (1999). *TRANSIMS traffic flow characteristics*.

Nagel, K. (1996). "Particle hopping models and traffic flow theory." *Physical Review E,* Copyright by The American Physical Society. Vol. 53, pp. 4655-4672.

Rickert, M., Nagel, K., Schreckenberg, M. and Latour, A. (1996). "Two lane traffic simulations using cellular automata." *Physica A 231,* pp. 534-550.

Schreckenberg, M. (2002). "Simulation of the autobahn traffic in north rhine-west phalia." *International Symposium on Transport Simulation*, pp. 193-200.

Schadschneider, A. and Schreckenberg, M. (1997). "Traffic models with 'slow-to- start' rules." *Ann. Physic 6*, p. 541.

Shah, A. A., Kim, H., Baek, S., Chang, H. and Ahn B. (2008). "System architecture of a decision support system for freeway incident management in Republic of Korea." *Transportation Research Part A*, Vol. 42, pp. 799-810.

Takayasu, M. and Takayasu, H. (1993). "Phase transition and 1/f type noise in one dimensional asymmetric particle dynamics." *Fractals, Vol. 1*, Issue 4, pp. 860-866.

TRB (1978). *Grade effects on traffic flow stability and capacity*, NCHRP Report 185.

Wagner, P., Nagel, K. and Wolf, D. E. (1997). "Realistic multi-lane traffic rules for cellular automata." *Physica A 234*, pp. 687-698.

Yoon, B. (2009). "Development of lane-changing model for two-lane freeway traffic based on CA." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 3D, pp. 329-334 (in Korean).

Yoon, B. (2011). "Development of lane-lane highway vehicle model based on discrete time and space." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 31, No. 6D, pp. 785-791 (in Korean).