

CA 2차로 도로 차량모형의 보다 현실적인 추월행태 개발

윤병조*

Yoon, Byoung Jo*

Development of More Realistic Overtaking Behavior Model in CA-Based Two-Lane Highway Environment

ABSTRACT

The two characteristics of two-lane-and-two-way traffic flow are platoon and overtaking triggered by low-speed vehicle. It is crucial to develop a robust model which simultaneously generates the behaviors of platoon by low-speed vehicle and overtaking using opposite lane. Hence, a microscopic two-lane and two-way vehicle model was introduced (B. Yoon, 2011), which is based on CA (Cellular Automata) which is one of discrete time-space models, in Korea. While the model very reasonably explains the behaviour of overtaking low-speed vehicle in stable traffic flow below critical density, it has shortcomings to the overtaking process in unstable traffic flow above the critical density. Therefore, the objective of this study is to develop a vehicle model to more realistically explain overtaking process in unstable traffic flow state based on the model developed in the previous study. The experimental results revealed that the car-following model robustly generates the various macroscopic relationships of traffic flow generating stop-and-go traffic flow and the overtaking model reasonably explains the behaviors of overtaking under the conditions of both opposite traffic flow and stochastic parameter to consider overtaking in unstable traffic flow state. The vehicle model presented in this study can be expected to be utilized for the analysis of two-lane-and-two-way traffic flows more realistically than before.

Key words : Two-lane highway, Vehicle model, Cellular automata, Unstable state, Realistic overtaking

초 록

2차로 양방향 교통류의 주요한 특징은 저속차량으로 인한 차량군과 차량추월이다. 따라서 교통류 모의실험을 이용하여 2차로 도로 교통류의 미시적 분석하기 위해서는 차량군의 행태와 더불어 대향차로를 이용한 추월 행태를 동시에 구현하는 차량모형의 개발이 필수적이다. 이에 따라 국내에서는 이산적 시공간을 기반으로 2차로 양방향 교통류 모형이 소개 되었다(윤병조, 2011). 그러나 선행연구는 임계밀도 이하의 안정 교통류 상태에서 차량추월 행태의 설명력이 우수한 반면, 불안정 교통류 상태에서 차량추월의 행태를 설명하기에는 단점을 가지고 있었다. 따라서 본 연구에서는 선행연구를 기반으로 불안정 교통류 상태에서 보다 현실적으로 차량추월을 구현하는 모형을 수정/개발하였다. 개발된 모형의 평가를 위하여 모의실험을 수행한 결과, 차량추종모형은 교통류의 미시적 특성중 하나인 가다서다(Stop-and-go) 현상을 설명하면서 거시적 교통류 관계를 효과적으로 구현 하였으며, 추월모형은 대향방향 교통류와 차량추월 확률변수의 조건에 따라 불안정 교통류 상태에서도 합리적으로 차량추월을 설명하였다. 따라서 본 논문에서 제시된 차량모형은 보다 더 현실적으로 2차로 도로 교통류의 분석에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

검색어 : 2차로 도로, 차량모형, Cellular automata, 불안정 교통류, 현실적 차량추월

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

Received June 19, 2013/ revised July 15, 2013/ accepted August 12, 2013

1. 연구의 배경 및 목적

국내 일반국도, 지방도(국지도 포함), 군도의 포장도 총연장(km, 2009년 12월 기준)은 42,609로서 이중 2차로 양방향 도로(이하 2차로 도로)는 34,254로서 약 80.4%를 차지하고 있다. 그러나 2차로 도로 분석을 위한 시뮬레이터는 미국에서 개발된 TWOPAS (Two-lane PASsing)의 입력변수를 국내 환경에 맞게 조정하여 사용하고 있는 수준으로서 2차로 도로를 분석하기 위한 시뮬레이터의 개발은 사실상 전무한 실정이다. 이와 더불어 시뮬레이터를 개발하기 위한 2차로 차량모형에 대한 연구도 매우 부진한 상태이다.

따라서 2차로 도로 시뮬레이터를 개발하기 위해서는 2차로 도로에 대한 모형개발이 당면과제라 할 수 있다. 그러나 관련 모형의 개발에 대한 선행연구는 연속류와 단속류를 대상으로 주로 수행되고 있으며, 차량추종과 차량추월이 결합된 2차로 도로 차량모형에 대한 연구는 전무한 상태라고 할 수 있다. 추가적으로 Corsim, Vissim, Paramics 등과 같은 미시적 차량 시뮬레이터는 2차로 도로의 특성인 차량군과 차량추월을 현실적으로 구현할 수 없는 한계가 있다.

이러한 문제를 극복하고자 통계물리학과 이산적 시공간을 기반으로 하는 Cellular Automata(이하 CA)를 이용한 2차로 차량모형이 개발되었으나(Yoon, 2011), 임계밀도이상의 불안정 교통류에서 차량추월을 과대 또는 비현실적으로 설명하는 한계를 가지고 있었다. 따라서 본 연구에서는 선행연구에 대한 후속 연구로서 기존 연구를 기반으로 안정 교통류와 불안정 교통류에서 차량추월을 설명하기 위한 모형을 개발하였다. 모의실험 결과, 차량추월모형은 추월을 위한 공간의 확보가 가능한 밀도(약0.3)의 수준까지 안정 교통류와 불안정 교통류에서 기존 모형보다 현실적으로 차량추월을 구현하였으며, 수정된 차량추월 모형은 차량추종모형과 결합하여 2차로 도로의 특징인 차량군을 보다 현실적으로 설명할 수 있음을 보였다.

2. 기존연구 고찰

본 연구는 대규모 가로망 시뮬레이션을 위한 차량모형에 이용되는 CA이론을 이용하여 보다 현실적인 2차로 차량모형을 개발하고 그 가능성을 실험적으로 분석하는데 그 목적이 있다. 따라서 기존연구 고찰은 2차로 시뮬레이션 모형과 CA기반 차량모형으로 수행하도록 한다.

2차로 도로의 교통류 분석을 위한 모의실험기는 TWOPAS (Two-lane PASsing), TRARR(Traffic on Rural Roads), SOVT(Simulation Of Vehicle Traffic) 등이 있으며, TWOPAS와 TRARR가 대표적으로 많이 이용되고 있다. 미국의 MRI(Midwest

Research Institute)에서 개발된 TWOPAS의 전신은 TWOWAF (Two Way Flow)이다. TWOWAF는 NCHRP Report 185에서 적용하였으며, 캘리포니아 교통부의 2차로 도로 연구(May et al., 1986)에서 집중적으로 검토된 이후, TTI(Texas Transportation Institute)에서 지속적인 개발을 수행함으로써 오늘날의 TWOPAS로 이어져오고 있다. 호주에서 개발된 TRARR은 호주 도로연구위원회(ARRB, Australian Road Research Board)에서 자체적으로 개발하였다.

TWOPAS는 다양한 도로/교통 특성(도로기하구조, 차로폭, 앞지르기 시거, 앞지르기 차로의 유무, 교통 통제, 운전자 특성, 교통특성 등)을 입력자료로 이용하지만, TRARR보다 연산속도가 느리며 미터법을 적용하지 않고 차량 애니메이션이 취약하다. 반면, TRARR은 ①TWOPAS보다 연산수행 속도가 빠르며, ②미터법을 사용함으로 국내에 적합하며, ③차량 애니메이션이 가능하다.

국내의 경우, TWOPAS를 도입하여 국내의 환경에 적합하도록(입력) 파라미터를 조정하여 개발된 TWOPAS K1가 있으나(Lee et al., 1993), 독자적인 시뮬레이터는 개발되어 있지 않은 실정이다. 2차로 도로 시뮬레이터 개발을 위한 2차로 차량모형의 개발은 Yoon(2011)의 논문이 유일한 정도로서 사실상 2차로 차량모형의 개발과 관련된 연구는 전무한 실정이다.

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

CA 차로변경모형은 차량추종모형에 비하여 폭넓은 연구가 수행되지는 않고 있다. 소수의 차로변경모형(Rickert et al., 1996; Wagner et al., 1997)이 소개되었으나 일방향 다차로의 차로변경을 설명하기 위한 모형으로서 모형의 근간은 통행시간 최적화와 강압적 차로변경으로 설계되었다. 국내의 경우, Yoon(2009)는 연속류를 대상으로 일방 2차로 차로변경모형을 소개하였으며, 교통량수준에 따라 다양한 차로이용률을 설명할 수 있음을 실험적으로 보였다.

그러나 CA차량모형은 다음의 한계를 가지고 있다. 차량추종모형의 경우 2차로 도로의 주요 특성인 차량군의 설명이 어려우며, 차로변경모형은 2차로 도로의 차로변경 형태인 차량추월을 설명할 수 없는 한계를 가지고 있다. 그러나 2차로 도로의 차량추월에는 적용할 수 없는 한계를 가지고 있다. 따라서 국내의 자체적인 2차로 차량모형이 부재한 현실에서 CA이론을 기반으로 하는 2차로 차량

모형의 개발은 많은 부분이 2차로 도로로 구성된 전국 도로망을 시뮬레이션하기 위한 선행요소라 할 수 있겠다.

3. 차량 모형의 개발

2차로 차량모형은 차량추종모형과 차량추월모형이 결합되어야 한다. 따라서 차량모형의 개발은 차량추종모형과 추월모형으로 구분하여 기술하도록 한다.

3.1 차량추종모형의 개발

NaSch모형(Nagel and Schreckenberg, 1992)을 근간으로 CA 차량추종모형은 지속적인 개발이 수행되어 오고 있으나, 모형의 Framework는 ①전방 Gap 탐색, ②(확률적 속도감소를 통한)속도 갱신, ③차량이동의 3단계로 규칙으로 구성되며, 모든 차량에 대하여 병렬적 연산을 수행한다. 그러나 기존 CA차량모형은 이산적 모의실험 시간(t)에서 선행차량과 후행차량간의 비 점유된 이산적 공간인 셀의 개수로 설명되는 전방 gap(g_t , 셀)과 차량의 속도(v_t , 셀/초)의 조건이 $g_t \leq v_t$ 인 경우 속도이상 주행할 수 없는 단점을 가지고 있어 2차로 도로에 적용하기에는 한계를 가지고 있다. 따라서 Yoon(2011)은 기존 CA차량추종모형의 수정하여 2차로 도로의 차량추종 주행행태에 적합하도록 차량추종모형을 개발하였으며, 모형의 구성은 ①전방차량의 주행상태를 고려한 expanded gap (g_e)의 산정, ②(확률적 속도감소를 통한)속도갱신, ③차량이동의 3단계로 규칙으로서 간략히 설명하면 다음과 같다.

3.1.1 Expanded gap(g_e) 산정

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

- 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)

3.1.2 속도 갱신 with randomization

If $r < p_n$ then

$$v_{t+1} = \max[0, \min[v_t, g_e - 1, v_{\max} - 1]] \quad (2)$$

Else

$$v_{t+1} = \min[v_t + 1, g_e, v_{\max}] \quad (3)$$

- 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 : 무작위적 감속확률(0.0~1.0)
- r : 난수값(0.0~1.0)

3.1.3 차량이동

$$x_{t+1} = x_t + v_{t+1} \quad (4)$$

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

3.2 추월모형의 개발

2차로 도로에서 저속차량의 후미에서 주행하는 차량은 대항방향 차로로 차로변경을 수행한 후 가속하여 저속차량을 추월하고 해당 차로로 복귀하게 되며, Fig. 1은 CA의 이산적 공간구조에서 추월과정을 도식화하여 보여주고 있다.

(저속차량) 추월모형은 ①좌측차로로의 좌측차로변경모형과 ②추월 후 해당 주행차로로 복귀를 위한 우측차로변경모형으로 구성된다. 따라서 추월모형은 ①좌측방 차로변경모형과 ②우측방 차로변경모형으로 구분하여 기술하도록 하며, 모형의 설명을 위하여 편의상 차량의 주행방향은 동방향(EB)과 서방향(WB)으로 구분하도록 하며, EB 차량의 추월을 기준으로 설명하도록 한다.

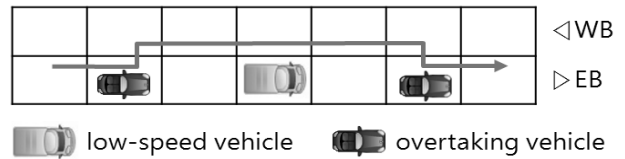


Fig. 1. Discrete Structure of Road Space and Overtaking Path

3.2.1 좌측방 차로변경모형

좌측방 차로변경모형은 다차로 차로변경에서의 같은 선호적인 통행시간 최적화(travel time optimization)이라 할 수 있으나, 좌측방 차로변경 후 전방차량의 진행방향이 역방향이라는 점이 다르다. 따라서 좌측방 차로변경을 수행하기 위해서는 ①좌측차로 전방에 역방향으로 주행중인 차량과 충돌이 발생하지 않도록 충분한 공간을 확보해야 하며, ②역방향 차로에서 저속차량을 공간적으로 추월한 후 원래 차로로 복귀를 고려하여 충분한 진입공간이 필요하다. 이상의 조건을 고려하면 좌측방향 차로변경은 5개 조건 즉, ①동기조건, ②측방조건, ③전방조건, ④측전방조건, ⑤확률조

건을 만족해야 하며, 조건 ②, ③, ④는 차량충돌을 방지하기 위한 안전조건에 해당한다.

① 동기조건은 선행차량이 저속차량(트럭 및 승용차)이면 만족한다. 이는 선행차량이 트럭이더라도 일반적으로 운전자는 트럭의 후미에서 추종하는 행태를 꺼려하는 특성을 가지고 있기 때문이다.

② 추방조건은 모형수행의 속도를 고려하여 좌측방 차량의 인접 셀이 점유되지 않으면 만족하게 된다.

③ 전방조건은 순방향 차량의 전방 (교통류 상태) 조건으로서 추월후 차량의 복귀가 매우 용이한 상태이어야 하며, 순방향 차로에서 출월중인 역방향 차량과의 충돌을 피할 수 있어야 한다. 따라서 전방조건을 결정하기 위한 지표는 순 방향의 전방밀도와 역방향 추월차량의 순 방향 차로상에 존재유무로 정의하였다. 전방조건을 모형화하기 위하여 Fig. 2와 같이 추월해야 할 거리인 추월거리(d_o , 셀)와 추월거리를 고려한 추월시간(t_o , 초) 동안의 순방향 주행거리와 역방향 추월 중 차량의 주행거리를 고려한 전방상태거리(d_s , 셀)를 이용하였으며, 추월차량의 추월거리(d_o)는 시간대(t)에서 선행 차량(f)의 위치(x_t^f)와 추종차량의 위치(x_t)를 이용하여 Eq.(5)와 같이 산정된다. 그리고 본 논문에서 o는 추월(overtaking)을 의미한다.

$$d_o = x_t^f - x_t + 1, x_t^f > x_t \quad (5)$$

추월시간(t_o , 초)은 추월거리(d_o), 추월차량의 시간대(t)에서 속도(v_t^o), 추월 가속도(a_o , 셀/초), 추월 최대속도(v_{max}^o), 선행(p) 저속차량(l)의 최대속도(v_{max}^{pl} , 셀/초)를 이용하여 산정하며, Eq.(6)의 조건을 만족하는 추월시간(t_o) 중 최소값이다. 추월시간 이후 추월차량은 해당방향으로 강압적으로 복귀해야 함으로 최소값을 적용하는 것은 합리적이다.

$$\sum_{t_o=1}^{\infty} \{ \min [v_t^o + t_o \times a_o, v_{max}^o] - v_{max}^{pl} \} \geq d_o \quad (6)$$

전방상태거리(d_s , 셀)는 추월차량의 시간대(t)에서 추월속도(v_t^o)와 추월시간(t_o), 추월 가속도(a_o), 추월 최대속도(v_{max}^o), 그리

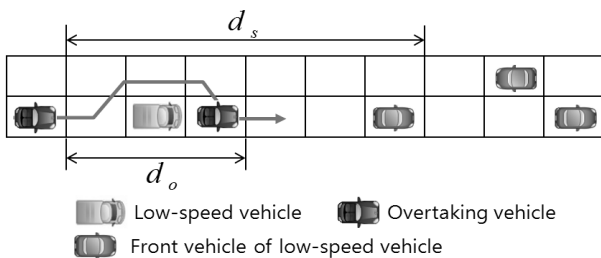


Fig. 2. Overtaking Space and Front State Distance

고 일반차량의 최대속도(v_{max})를 이용하여 Eq.(7)과 같이 산정되며, 추월시간동안 추월차량의 주행거리(셀)와 역방향 차량의 주행거리의 합으로 구성된다.

$$d_s = \sum_{i=1}^{t_o} \min [v_t^o + i \times a_o, v_{max}^o] + v_{max} \times (t_o + 1) \quad (7)$$

Yoon(2011)의 연구에서 전방조건으로 ④ 전방상태거리(d_s)내에 추월중 역방향 차량의 존재와 ⑤ d_s 내에 존재하는 동일방향 차량의 대수(n_{ds})를 이용하여 Eq.(8)과 같이 산정된 전방의 밀도(ρ_{ds} , 0~1.0)를 이용하였다.

$$\rho_{ds} = n_{ds} / d_s \quad (8)$$

전방조건④는 차량충돌을 방지하기 위한 합리적 접근방법이라 할 수 있다. 그러나 전방조건⑥는 선행연구에서와 같이 전방의 밀도(ρ_{ds})가 주어진 전방의 밀도 결정값($\rho_o, 0 \leq \rho_o \ll 1/(v_{max} + 1)$)에 대하여 $\rho_{ds} < \rho_o$ 조건을 만족하더라도 순방향 전방의 교통류 밀도가 임계밀도 이상일 경우 즉, 불안정 교통류일 경우 저속차량이 혼잡의 후미에 도착하는 경우가 발생하며 또한 해당 전방밀도조건을 만족하더라도 추월중인 차량이 해당차로로 복귀하면서 전방밀도를 만족하지 못 경우가 발생하게 된다. Fig. 3은 동방향 밀도(ρ_{eb})=0.4, 서방향밀도(ρ_{wb})=0.01, 중차량 구성비 5% 상태에서 WB 차로의 차량계적 시공도를 보여주고 있다(EB 차량(검은색)의 이동방향 \, WB 차량(청색)의 이동방향 /). 위에서 언급한 이유로 차량은 우측방 차로변경 조건을 만족할 수 없어 EB 차로로 복귀하지 못하고 WB 차로를 비지속적으로 주행한 후 복귀하고 있거나, EB 차량과 충돌 후 복귀하고 있다. 이러한 모형의 한계는

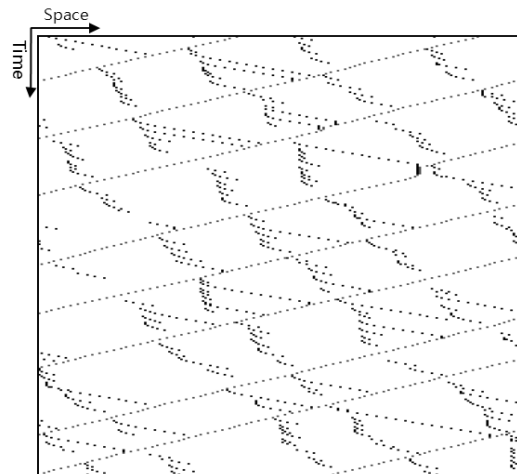


Fig. 3. Failure of Overtaking Under Unstable Traffic State

모형의 개발시 비혼잡 상태 교통류의 추월을 설명하기 위하여 모형이 개발되었기 때문이다.

이상에서 기술한 문제점은 일반적으로 운전자 들이 요구하는 저속차량의 전방 비점유 공간과 추월중인 차량의 대수를 이용하여 전방밀도($\rho_f \leq 0.1$)를 Eq.(9)와 같이 고려함으로써 해결이 가능하다. d_f 는 일반적으로 추월을 수행하고자 하는 운전자에게 요구되는 저속차량의 전방 공간(약 50m=8셀)이며, 운전자가 추월을 수행하고 해당 차로로 복귀하는 시간($t + \alpha$)의 밀도는 이전에 출발한 즉, 시간(t)에서 추월중인 차량과 전방에 존재하는 차량의 대수로 계산된다.

$$\rho_f = (n_f + n_o) / d_f \quad (9)$$

d_f : 저속차량(f)의 전방의 운전자 인식 거리(셀)

n_f : d_f 내에 차량대수

n_o : 추월중 차량대수

④측전방조건은 역방향 차로상에 역방향 차량이 전방상태거리 내에 존재하지 않으면 만족하게 된다. 이상의 모든 조건이 만족되면 다음의 확률조건을 이용하여 최종적으로 좌측방 차로변경을 결정하게 된다.

⑤확률조건은 주어진 추월 차로변경확률(p_o , 0.0~ 1.0)보다 무작위값(0~1.0)이 작으면 만족하게 된다. p_o 은 저속차량 추월의 선호도를 고려함과 동시에 추월대수를 조정하는 변수역할을 수행한다.

3.2.2 우측방 차로변경모형

우측방 차로변경모형은 역방향 차로에서 저속차량을 추월한 후 순방향 차로로 복귀하는 차로변경이며, 이러한 우측방 차로변경은 역방향 차로에서 주행하는 차량과의 충돌을 회피해야 하기 때문에 강압적 차로변경이다. 따라서 우측방 차로변경의 조건은 우측 차로의 셀이 비점유된 경우 만족하게 된다. 이 경우 우측방 차로변경 후 선행차량-해당차량, 해당차량-후미차량간의 차량간격(gap)보다 추종차량의 속도가 높은 경우가 발생하지만 차량추종모형의 확장된 gap(g_c)로 인하여 차량은 급격히 감속 또는 정지하지 않는다.

4. 개발모형의 평가

4.1 모의실험 설계

개발모형의 평가를 위한 실험설계는 다음과 같다. 차량모형은 차량추종모형과 추월모형으로 구분하여 평가하였다. 차량추종모

형의 평가를 수행한 후, 차량추종모형과 차로변경모형을 결합하여 평가하였다. 모의실험 네트워크는 무한원형 링크에서 수행하였으며(Yoon, 2011) 각 방향별로 구성된다. 시스템의 조건은 셀 길이 6m, 링크길이(60,000m = 셀 10,000개)이다. 기하구조는 평직선구간으로서 추월시거가 확보된다고 가정하였다.

4.2 차량추종모형의 평가

차량추종모형의 행태는 최대속도(v_{max})와 감속확률값(p_n)에 의해 결정된다. 이는 임계밀도($\rho_c = 1 / (v_{max} + 1)$) 이하에서 전방의 유효 차량간격(g_c)이 v_{max} 보다 길기 때문에 차량의 속도는 g_c 에 의해 영향을 받지 않기 때문이다(Chang et al., 2004). 따라서 임계밀도(ρ_c) 이하에서 차량의 속도인 자유교통류 속도(v_{ff} , kph)는 셀 길이(l_c), v_{max} , p_n 을 이용하여 식 (9)와 같이 산정된다(Chang et al. 2005). 그러나 혼잡밀도(ρ_{jam})에 밀도가 가까워질수록 차량의 속도는 국부적인 혼잡과 v_t 보다 작은 g_{eff} 에 의해 영향을 받기 때문에 음지수형으로 감소한다(Chang et al., 2004).

$$v_{ff} = 3.6 \cdot \{ (1 - p_n) \cdot v_{max} + p_n \cdot (v_{max} - 1) \} \quad (10)$$

모의실험을 위한 시나리오는 다음과 같이 설정하였다. $v_{max}=2, 3$ 로 각각 설정하였으며, 이는 저속차량의 속도 30~40kph, 최대속도는 2차로 양방향 도로의 최고제한속도 60kph를 고려하기 위함이다. p_n 은 0.01~0.5까지 0.01단위로 50개이며, 이는 $p_n > 0.5$ 일 경우 Noise의 기능을 상실하기 때문이며 이러한 Noise 기능상실은 정지차량의 가속을 지나치게 감소시키기 때문이다(Chang et al., 2005). 링크의 밀도(ρ)는 0.01~0.99까지 0.01단위로 99개이다. 따라서 총 시나리오 개수는 9,900 (2×50×99)개이며, 각 시나리오 별 시뮬레이션 시간은 3,600초 이다.

CA 추종모형은 차량을 간략하게 모사하면서 교통류의 거시적 관계를 구현하도록 설계되었다. 따라서 차량추종모형은 거시적 교통류의 관계를 합리적으로 설명해주어 한다. Fig. 4와 5는 $v_{max}=2, 3$ 의 경우에 대하여 p_n 에 따른 거시적 관계[교통량밀도($q - \rho$), 속도-밀도($s - \rho$)] 관계를 각각 보여주고 있다. p_n 에 의하여 자유교통류 속도(v_{ff} , kph), 용량, 임계밀도가 설명되고 있다. $p_n = 0$ 의 경우 임계밀도(ρ_c)는 $1 / (v_{max} + 1)$ 이며, 이는 p_n 으로 설명되는 차량의 감속에 대한 기여도가 0이며 시스템내의 모든 차량은 최대속도를 유지할 수 있는 gap을 확보하기 때문이다. $q - \rho$ 관계는 전형적인 종형을 보이고 있으며, 다양한 형태의 거시적 행태를 설명하고 있다. 그리고 p_n 이 증가함에 따라 v_{ff} , q_c , ρ_c 는 각각 감소한다.

2차로 도로의 주요한 특성중 하나는 저속차량으로 인한 기다서다(stop-and-go) 현상과 차량군이다. Fig. 6은 ρ_c 이상의 불안정 교통류 상태에서 기다서다(stop-and-go) 교통류를 $\rho=0.3, 0.5$ 로

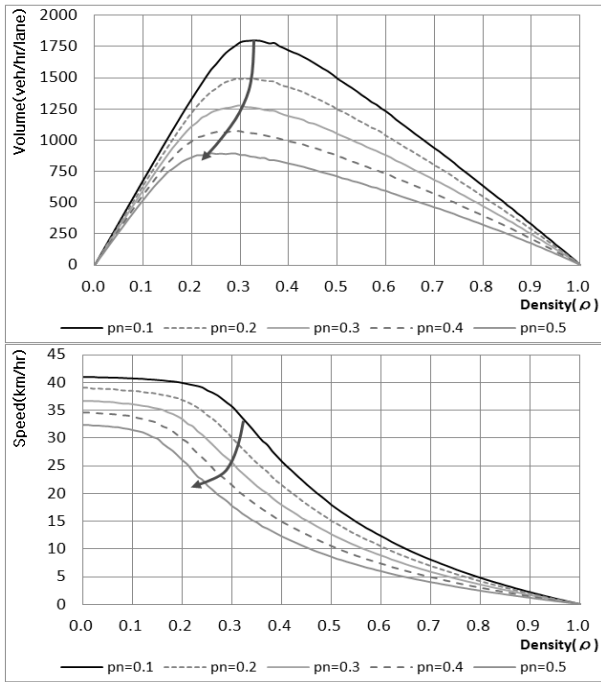


Fig. 4. Traffic Flow Relationships With $v_{max}=2$

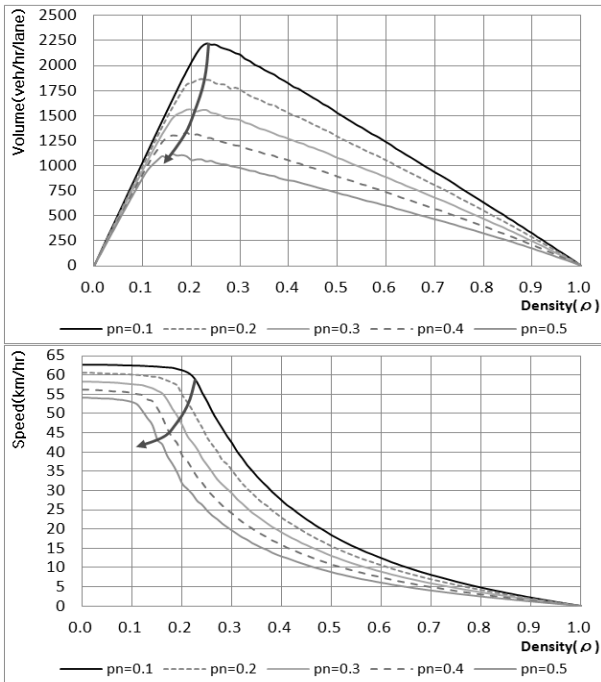


Fig. 5. Traffic Flow Relationships With $v_{max}=3$

각각 보여주고 있으며, 차량의 이동방향 \searrow 이다. 초기 단계에서 차량의 혼잡은 국부적으로 발생하며, 국부적 혼잡은 일정 시간이후 wide-moving jam으로 성장하고 있다. 이러한 성장의 과정에서

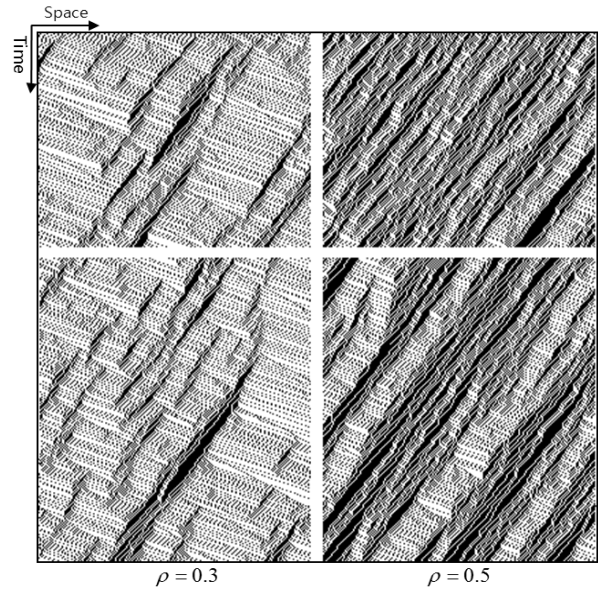


Fig. 6. Stop-and-go Traffic Flow

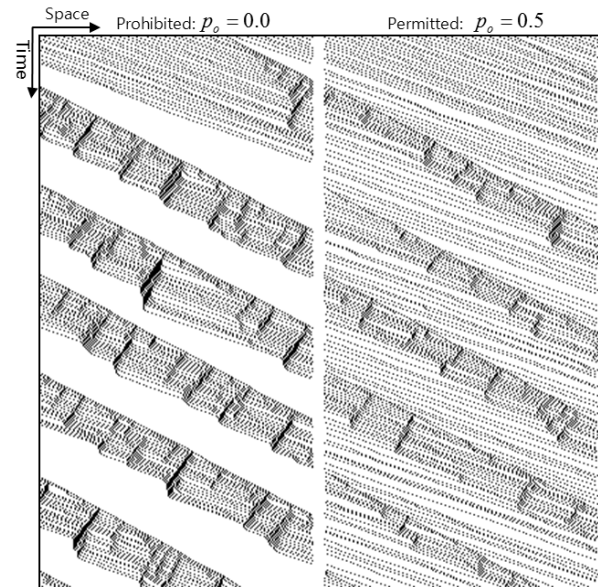


Fig. 7. Behaviors of Vehicle Platoon

교통류의 상태는 혼잡과 비혼잡 교통류로 양분화되어 기다서다 현상을 설명하고 있다. Fig. 7은 $\rho_{cb}=0.15$, $\rho_{wb}=0.01$, 저속차량 구성비(pt_{ls} , $0.0 \sim 1.0$)=0.05의 상태에서 차량군의 형태를 보여주고 있다. 추월금지의 경우 저속차량의 후방 차량군은 (국부적인) 기다서다 현상을 반복하면서 일정길이의 차량군을 형성하면서 전방으로 높은 밀도를 전파시키고 있으며, 추월이 허용되는 경우 차량군의 (국부적인) 혼잡은 크게 발생하지 않으면서 보다 합리적으로 차량군을 형성하면서 저속차량을 추종하고 있다.

4.3 추월모형의 평가

추월모형을 평가하기 위한 시나리오는 차량추종모형 거시적 교통류관계 분석결과에 기초하여 일반차량과 저속차량의 $[v_{max}, p_n]$ 은 각각 $[3, 0.22]$, $[2, 0.15]$ 로 선정하였으며, 이 경우 $[v_{ff}, q_c]$ 는 각각 $[60, 1,800]$, $[40, 1,650]$ 이다. 추월중 차량의 경우, $v_{max}=4$, $p_n \approx 0.19$ 로 설정하였으며, 추월시 평균 최대속도는 약 82.1이다. 그리고 동방향 저속차량의 구성비는 5%로 하였다. 방향 별 밀도는 동방향 밀도의 경우 0.0~0.6까지 0.1단위로 6개, 서방향 밀도의 경우 0.0~0.3까지 0.05단위로 7개로 설정하였다. 그리고 추월 차로변경확률(p_o)는 8개[0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.75,

1.0]이다. 따라서 전체 모의실험 시나리오는 336개이며, 각각의 경우에 대하여 7,200초 모의실험을 수행하였다. 결과분석은 동방향 을 기준으로 분석하였다.

Fig. 8과 9는 동방향 밀도(ρ_{eb})와 서방향 밀도(ρ_{wb})에서 차량의 궤적(동방향 진행방향 \, 서방향 진행방향 /)을 보여주고 있으며, 임계밀도(ρ_c)의 기준은 $v_{max}=3$, $p_n \approx 0.22$ 인 경우이다. 본 연구에서 개발한 추월모형은 $\rho=0.3$ 의 경우까지 Fig. 3과 같은 추월실패가 발생하지 않고 있다. 또한 $\rho > 0.3$ 인 경우 혼잡교통류로서 사실상 추월의 거의 발생하지 않는다. 따라서 선행연구의 단점인 추월실패 및 혼잡상태에서 비 추월에 대한 문제를 극복하고 있다.

Fig. 10~13은 $p_o=[0.0, 0.3, 0.5, 1.0]$ 별 $\rho_{wb}=[0.0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3]$ 에 따른 동방향 $q-\rho$ 를 보여주고 있으며, $\rho_{wb} > 0.3$ 인 경우 혼잡 교통류 상태로서 의미는 없다. 분석결과, $p_o=0.0$ 인 경우 즉, 차로금지 구간의 경우 교통류의 $q_c \approx 1620$ 대/시, $\rho_c \approx 0.31$ 로 분석되고 있다. p_o 가 증가하면 추월빈도가 증가하여 교통량은 증가하게 된다. 그러나 $\rho_{wb} \geq 0.15$ 이고 $\rho_{eb} > 0.3$ 인 경우 추월에 의한 교통량 증대효과는 거의 발생하지 않는다. 이는 $\rho_{eb} > 0.3$ 인 경우 Fig. 6과 같은 혼잡교통류가 존재하여 전방조건을 만족하기 어려우며, 사실상 약간의 추월을 구현하였지만 추월을 수행한다 하더라도 통행시간을 감소시킬수 없기 때문이며, $\rho_{wb} \geq 0.15$ 인 경우 차량간 평균 비점유 공간은 약 34m(5.67셀 $\approx 1,000 / 6.0 * 0.15-1$)로서 좌측방조건을 만족하기 어렵기 때문에 합리적 결과라

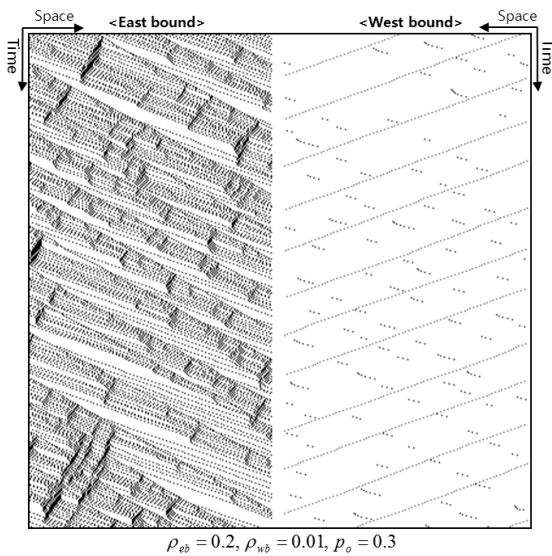


Fig. 8. Time-Space Trajectory: Stable State

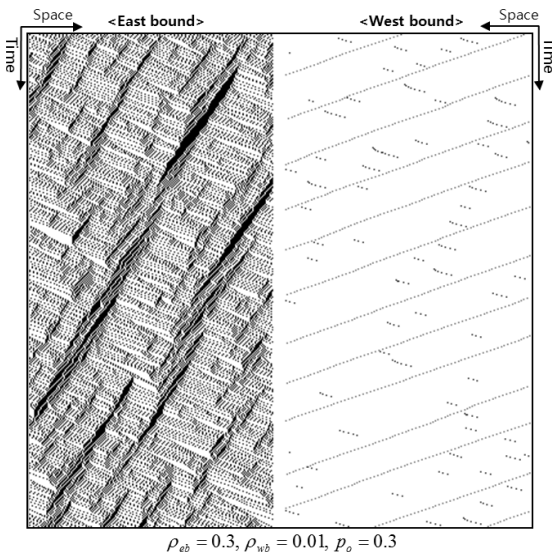


Fig. 9. Time-Space Trajectory: Unstable State

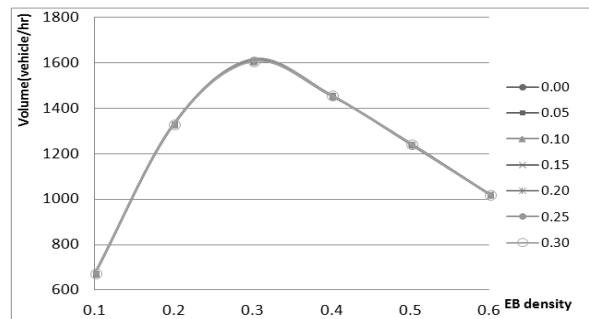


Fig. 10. EB $q-\rho$ Relationship According to ρ_{wb} ; $p_o=0.0$

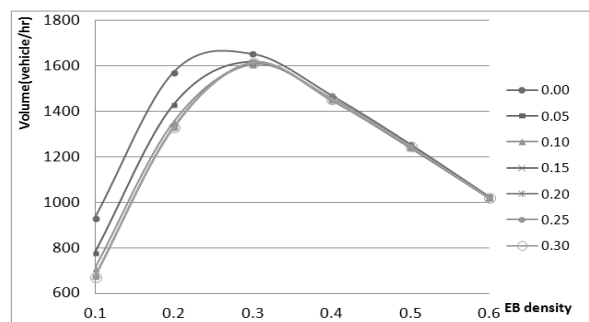


Fig. 11. EB $q-\rho$ Relationship According to ρ_{wb} ; $p_o=0.3$

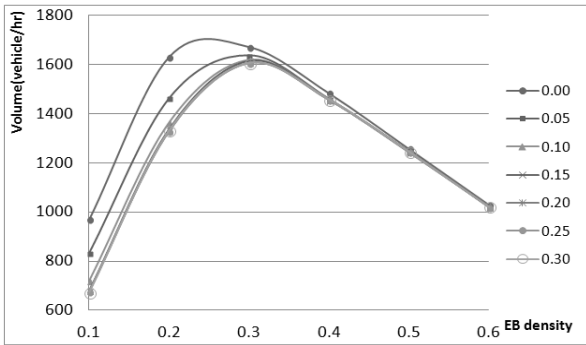


Fig. 12. EB $q-\rho$ Relationship According to $\rho_{wb}; p_0=0.5$

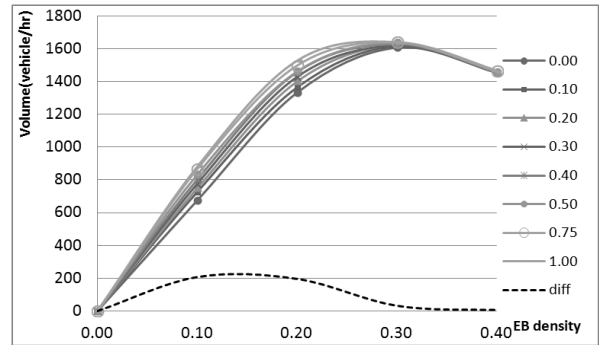


Fig. 14. EB $q-\rho$ Relationship According to $\rho_o; p_{wb}=0.05$

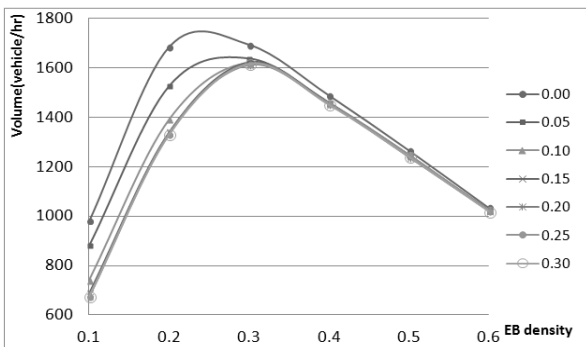


Fig. 13. EB $q-\rho$ Relationship According to $\rho_{wb}; p_0=1.0$

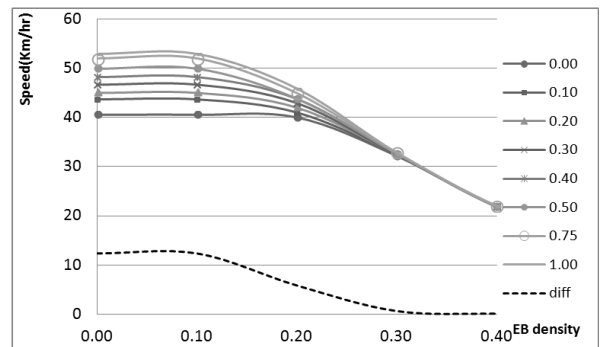


Fig. 15. EB $s-\rho$ Relationship According to $\rho_o; p_{wb}=0.05$

판단된다. 또한 $p_0=1.0, \rho_{wb}=0.0$ 인 경우에도 용량은 약 1,720으로서 일반차량의 용량인 1,800에 도달하지 않고 있다. 이는 저속차량의 비율이 5%인 상태이고 저속차량의 용량을 1,650으로 설정하였기 때문이다. 상대적으로 판단하면 $p_0=0.0$ 인 경우 1,620대/시에서 추월로 인하여 교통량은 200대 증가하였다고 판단할 수 있다. 이상의 결과를 요약하면 대항방향 $\rho > 0.1$ 이고 해당방향 $\rho > 0.33$ 즉, 저속차량의 임계밀도 이상인 경우 해당 2차로 양방향 교통류 시스템에서 추월로 인한 용량증대는 발생하지 않는다. 그리고 추월의 정도는 p_0 에 의해 설명이 가능하며, 대항방향 $\rho > 0.1$ 이고 $\rho > 0.33$ 인 경우 p_0 의 기능은 상실된다. 현실적으로 p_0 의 기능이 상실되는 해당 밀도조건에서 차량추월은 매우 위험한 일이며 차량 추월을 수행한다 하더라도 추월로 인한 통행시간 감소효과는 매우 미비하다.

Fig. 14와 15는 p_0 의 변화에 따른 $q-\rho$ 와 $q-s$ 의 변화정도를 보여주고 있다(각 그림에서 diff는 $[p_0=1.0$ 인 경우 거시적 변수 - $p_0=0.0$ 인 경우 거시적 변수를 의미함). 해당 모의실험 조건에서 p_0 는 $0 \leq \rho \leq 0.33$ 에서 합리적으로 추월을 설명하고 있으며, 약 205대 수준에서 설명이 가능한 것으로 나타나고 있으며, 추월은 해당 교통류시스템의 속도증가로 반영된다. $\rho_{eb} \leq 0.15$ 에서 동방향 교통류의 평균속도는 최소 40.5km/시에서 최대 52.9km/시로

변화하고 있다. 이는 p_0 을 이용하여 추월교통량 뿐만 아니라 이로 인한 교통류의 속도를 설명할 수 있음을 의미한다.

5. 결론 및 향후연구

국내의 경우 서두에서 언급한 필요성에도 불구하고 2차로 양방향 차량모형에 관한 연구는 실질적으로 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 양 방향 2차로 차량모형[차량추종+추월모형]을 개발하고 실험적으로 분석하여 그 적용가능성을 확인하였으며, 결론 및 향후연구는 다음과 같다.

첫째, 실시간 대규모 도로망의 모의실험에 성공한 차량모형은 CA기반 차량모형이 유일한 실정이다. 따라서 본 연구에서 개발된 CA이론 기반 2차로 차량모형은 연산수행이 매우 빠르며 메모리 측면에서 대규모 가로망의 적용에 용이하다.

둘째, 확장된 차량간격(g_e)을 도입하여 개발된 차량추종모형은 v_{max} 별로 다양한 거시적 교통류($q-\rho, s-\rho$) 관계와 자유교통류 속도(v_{ff})를 구현하였으며, 2차로 도로의 특징인 차량군과 가다사다 현상을 효과적으로 설명하였다.

셋째, 개발된 추월모형은 확률변수(p_0)를 이용하여 차량의 추월과 더불어 교통류의 교통량과 속도를 설명할 수 있음을 보였으며,

안정 교통류와 불안정 교통류에서 그 효과를 보였다. 따라서 선행연구에서 소개된 추월모형의 단점인 혼잡교통류 상태에서 비 현실적 추월을 현실적으로 설명하였다.

본 연구에서 개발된 CA기반 2차로 차량모형은 대규모 가로망을 모의실험하기 위하여 개발되었으며, 향후 연구는 다음과 같다.

본 연구에서는 연속류를 대상으로 모형을 개발하였다. 그러나 국도 교통류는 단속류와 연속류 구간이 공존한다. 따라서 향후 연구로는 본 연구에서 개발된 차량추종모형을 기반으로 신호교차로에서 모형을 개발하여야 한다.

국도는 부가차로(오르막차로, 양보차로, 턱아웃 등)를 이용하여 효과적인 운영을 도모하고 있다. 따라서 모형의 적용을 위해서는 부가차로에 대한 차량추종과 차로변경 모형의 개발이 필요하며, 향후 지속적인 연구와 현장조사 값을 기반으로 2차로 교통류의 특성에 대한 모형의 파라미터 정진이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 인천대학교 2013년도 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., 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.

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.

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.*

Lee, J., Choi, Y., Yoon, Y. and Yoon, H. (1993). "Development of two-lane, two-way highway simulation program (TWOPAS) for Korean condition." *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 11, No. 1, pp. 23-36 (in Korean).

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. (1996). *Particle hopping models and traffic flow theory*, Physical Review E. Copyright by The American Physical Society.

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. and Donnelly, R., Barrett, C. L. (1999). *TRANSIMS traffic flow characteristics.*

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

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

Schreckenberg, M. (2002). "Simulation of the Autobahn Traffic in North Rhine-West phalia." *International Symposium on Transport Simulation*, pp. 193-200.

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 the 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 the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 31, No. 6D, pp. 785-791 (in Korean).