

■ 論 文 ■

다양한 연속 교통류 구현을 위한 확률파장전파모형의 개발

A Study on Stochastic Wave Propagation Model to Generate Various Uninterrupted Traffic Flows

장 현 호

(한국도로공사 도로교통기술원
연구원)

백 승 걸

(한국도로공사 도로교통기술원
책임연구원)

박 재 범

(한국도로공사 도로교통기술원
책임연구원)

목 차

- I. 서론
- II. 기존연구의 고찰
 - 1. 연속류의 거시적 행태
 - 2. SWP모형 고찰
- III. 모형의 개발
 - 1. 모형의 구축방향
 - 2. 정지조작규칙(SMR)
- 3. 저가속규칙(LAR)
- 4. 구축된 SWP모형
- IV. 모의실험 및 평가
 - 1. 평가방법 및 모의실험 환경
 - 2. 모의실험 결과
- V. 결론 및 향후연구
- 참고문헌

Key Words : Cellular Automata, NaSch모형, 정지조작규칙(SMR), 저가속규칙(LAR), 파장전파(Wave Propagation), 다양한 연속교통류 구현

요 약

SWP(Stochastic Wave Propagation: 확률파장전파) 모형은 Cellular Automata(CA) 이론을 기반으로한 간략한 차량모형을 이용하여 개별차량의 확률적 행태와 혼잡의 전파를 모사하고, 통계물리학을 기반으로 교통류를 거시적으로 해석한다. SWP모형은 이산적 시공간 구조와 정수형 자료를 이용한 프로그램 지향적 모형구조를 가지며 연산수행속도가 빨라 대규모 가로망의 실시간 시뮬레이션을 가능하게 하였다. 그러나 비현실적인 충돌회피과정으로 인한 자연발생적 혼잡(Spontaneous jam)의 형성 때문에 미시적으로는 혼잡내에서 잠금현상(Lockup)이 발생하여 혼잡내 차량의 저속을 설명할 수 없고, 거시적으로는 혼잡의 밀도와 전파속도를 설명하기 어렵다는 한계를 가지고 있다.

본 연구에서는 비현실적인 차량의 정지과정을 보다 현실적으로 모사하기 위한 정지조작규칙(SMR: Stopping Maneuver Rule)과 혼잡내에서 차량의 낮은 가속을 설명하기 위한 저가속규칙(LAR: Low Acceleration Rule)을 기존의 SWP모형인 NaSch모형에 추가하였다. 이를 통해 미시적으로 보다 현실적인 차량의 정지과정을 모사하면서 혼잡내에서 잠금현상을 방지하고, 거시적으로 혼잡의 밀도와 전파속도를 설명함으로써 보다 다양하게 연속 교통류를 구현하는 모형을 구축하였다.

I. 서론

교통류의 행태는 크게 미시적 행태와 거시적 행태로 구분되며, 교통류 모형은 미시적모형과 거시적모형으로 개발되고 있다. 미시적 모형은 차량추종이론을 기반으로 개별차량의 주행행태를 모사하고, 거시적 모형은 유체역학이론을 기반으로 밀도의 전파과정을 이용한 충격파 분석을 통하여 거시적으로 교통류를 해석한다.

GM계열(GM Family)모형, 안전거리(Safety Distance)모형, 충돌회피(Collision Avoidance)모형 등의 차량추종모형은 주로 차량의 가·감속 능력을 설명하는 변수로 모형화되었다. 따라서 가·감속을 설명하는 파라미터가 실제값과 상응하면 혼잡교통류의 다양한 현상을 모사할 수 있을 것이다. 그러나 기존 차량추종 모형은 운전자의 행태를 결정론적으로 모사하기 때문에 혼잡교통류에서 발생하는 가다서다(Stop-and-go), 용량감소(Capacity drop) 등의 확률적(Stochastic) 행태를 설명하지 못한다. 또한 연속적 시공간 구조와 실수형 자료를 이용하기 때문에 대규모 도로망을 시뮬레이션하기 위해서는 빠른 연산수행속도와 많은 메모리 요구되는 등 실시간 시뮬레이션에 적용하기에는 많은 한계를 가지고 있었다.

이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로서 Nagel과 Schreckenberg(1992)은 미시적으로 간략한 CA차량추종모형을 이용하여 혼잡(Jam)의 전파과정을 설명하고, 거시적으로 통계물리학(Statistical physics)을 기반으로 거시적 교통류의 행태를 설명하는 확률과장전파(SWP) 모형을 소개하였다.

SWP모형은 확률변수를 이용함으로써 기존 결정론적 모형이 설명할 수 없었던 가다서다, 용량감소, 자연발생적 혼잡(Spontaneous Jam) 등을 빠른 연산수행속도로 모사함으로써 대규모 고속도로망 시뮬레이션(Schreckenberg 2002), 대규모 도시가로망 시뮬레이션(Nagel 외 1997, Chopard 외 1997) 모형으로서의 우수한 적용성을 보였다. 그러나 기존 SWP모형은 간략한 차량추종모형을 기반으로 교통류 행태를 설명하기 때문에 다양한 거시적 교통류행태를 설명하는데는 한계가 있으며, 모형의 정산이 용이하지 않다.

SWP모형관련 국내연구로는 “미시적 교통류 시뮬레이션 시스템 개발에 관한 연구(조중래 등, 2001)”, “고속도로 돌발상황 영향 분석 교통 시뮬레이션 모형 개발(노정현 등, 2001)”, “CA모형을 이용한 단기 구간통행

시간 예측에 관한 연구(이승재 등, 2003)가 소개되었으나, 기존 SWP모형의 적용에 관한 연구에 그치고 있어 교통류의 행태를 다양하게 설명할 수 있는 SWP모형의 개발에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

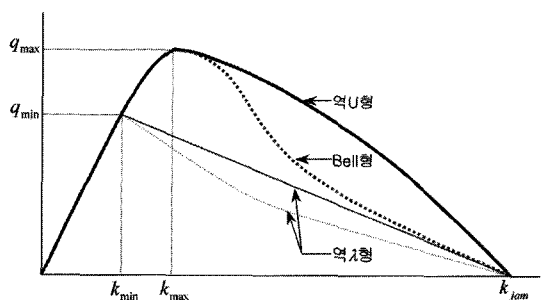
본 연구의 목적은 미시적 교통류 행태모사에 해한 기존 SWP모형의 한계를 극복하고, 보다 다양하게 연속류의 거시적 행태를 설명하는 모형을 개발하는 것이다. 이를 위해 2장에서 연속류의 거시적 행태와 기존 SWP모형의 고찰을 통하여 한계를 제시하였다. 3장에서는 다양한 거시적 행태를 설명하는 SWP모형을 개발하였으며, 4장에서는 개발된 SWP모형을 이용한 모의 실험을 통하여 <그림 1>의 4가지 다양한 교통류의 행태를 설명하였다.

II. 기존연구의 고찰

1. 연속류의 거시적행태

SWP모형은 간략한 차량추종모형으로 거시적 교통류의 행태를 설명하기 때문에 연속류의 거시적 행태에 관한 고찰을 선행하였다. 본 연구에서는 연속류의 행태를 거시적 q (교통량: 대/단위시간)- k (밀도: 대/단위거리)관계로 고찰하였으며, <그림 1>은 역U형, 종(Bell)형, 역 λ 형의 거시적 $q-k$ 관계를 보여주고 있다.

역U형의 $q-k$ 관계는 k_{max} 이상의 밀도에서 볼록(Convex)하게 나타나며, 그동안 유체역학기반의 거시적 교통류 모형에 이용된 OV(Optimal Velocity) 곡선의 형태 등으로 많이 이용되었다. 역U형 $q-k$ 관계는 q_{max} 에서 불연속이며, 불연속점에서 자유교통류의 용량이 혼잡교통류 용량으로 용량이 저하되는 용량저하(Capacity Drop) 현상이 나타난다(Edie 등, 1958, 1961).



<그림 1> 연속류의 거시적 행태

종형의 $q-k$ 관계는 k_{max} 이상의 밀도에서 $q-k$ 관계가 오목(Concave)하게 나타나며, 우리나라의 88 도시고속도로에서도 관측되었다(박상조, 2001).

역 λ형의 $q-k$ 관계는 정상상태 교통류에서 밀도 (k_{max})의 용량(q_{max})과 혼잡상태에서 밀도(k_{min} , $k_{min} < k_{max}$)의 용량(q_{min} , $q_{min} < q_{max}$)이 불연속적으로 존재한다. Koshi(1981)는 혼잡교통류($k > k_{min}$)의 $q-k$ 관계를 오목하게 관측하였으며, “운전자는 혼잡상황에서 반복적 감속과정을 경험하기 때문에 정상상태의 가속도만큼 가속하지 않는다. 따라서 혼잡상황에서 차간거리(Spacing)는 정상상태에서 차간거리보다 크다” 라고 하였다.

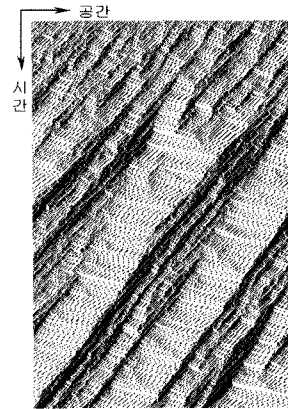
Kerner(1996, 1997, 1999)는 역 λ형의 $q-k$ 관계에서 $q_{max} \approx 1.5 \times q_{min}$ 라고 하였으며, 교통류를 자유교통류(Free flow), 동시교통류(Synchronized flow), 혼잡(Jam)으로 구분하였다. 그리고 혼잡교통류는 동적인 비선형 시스템으로서 기존의 정적·결정론적 이론으로는 설명할 수 없다고 하였다.

2. SWP모형 고찰

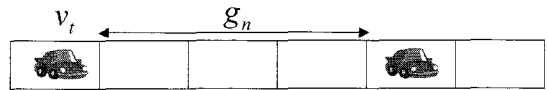
1) SWP모형의 개요

교통류는 확률적 변위와 속도를 가진 무한한 객체(Particle)로 구성된 동적체계(Dynamic System)라 할 수 있다. SWP모형은 전산학의 이진구조(1,0)를 근간으로하는 CA이론과 확률변수를 결합한 간략한 차량 추종모형을 이용하여 개별차량의 확률적 행태를 미시적으로 모사하고, 통계물리학을 근간으로하여 거시적 교통류의 행태를 설명한다. SWP모형은 <그림 2>의 개별차량의 시공간 궤적을 이용한 파장전파과정과 같이 자연발생적 혼잡을 모사하고, 혼잡에 도착하고 혼잡을 탈출하는 차량을 모사함으로써 교통류의 혼잡-비혼잡 과정을 전파시키는 과정을 통하여 거시적 행태를 설명한다.

SWP모형은 연산이 빠른 모형을 구축하기 위하여 연속적 시·공간 체계를 이산적 시·공간 체계로 구성한다. 공간적으로 <그림 3>과 같이 차로를 일정길이의 Cell(이하 셀)로 구분하고, 이산적 단위시간(보통 1초)으로 연산을 수행한다. 하나의 셀을 점유하는 차량의 정보는 이진구조를 이용하여 표현되며, 차량은 속도(v_t , 셀/단위시간)를 속성자료로 가지며, 선·후행 차



<그림 2> SWP모형의 파장전파 시공도
(참고: 차량의 시공간 이동방향은 \임.)



<그림 3> SWP모형의 공간구성 및 변수

량의 Spacing인 비점유된 셀의 개수(g_n)를 이용하여 속도를 갱신하면서 이동한다.

기존의 SWP모형으로는 NaSch모형(Nagel, Schreckenberg, 1992), T^2 모형(Takayasu, Takayasu, 1993), BJH모형(Benjamin 등, 1996), Krauss모형(Krauss, 1997) 등이 제시되었다. NaSch모형은 독일의 아우토반(Autobahn) 고속도로 실시간 시뮬레이션(Schreckenberg, 2002), TRANSIMS 과제를 통하여 수행된 미국 Dallas시 시뮬레이션(Beckman 등, 1997)을 통하여 모형의 수행속도와 적용성이 검증되었다. 본 연구에서는 기존의 NaSch모형에 정지차량의 가속을 설명하기 위한 STS규칙(Slow-To-Start rule)이

<표 1> 변수정의

변수	변수 정의(단위)
v_t	시각(t)에서 차량속도(셀/초)
v_{t+1}	시각(t+1)에서 갱신된 차량속도(셀/초)
v_{max}	차량의 최대속도(셀/초)
g_n	선행차량까지의 비점유된 셀 개수(셀)
ac,dc	차량의 가속도, 감속도(보통 1셀/초)
r	무작위 확률값(0~1)
p_n	차량의 감속 확률값(0~1.0)
p_{noise}	$v_t > 0$ 인 차량의 감속 확률값(0~1.0)
p_s	$v_t = 0$ 인 차량의 감속 확률값(0~1.0)
x_t	시각(t)에서 차량의 위치
x_{t+i}	시각(t+1)에서 차량의 위치

추가된 수정 NaSch모형(Barlovic, 1997)에 대하여 고찰하도록 하며, 변수는 <표 1>과 같이 정의한다.

수정 NaSch모형(이하 NaSch모형)은 차량의 속도에 따라 p_n 을 갱신(단계1), 차량은 v_{max} 까지 ac만큼 단계적으로 가속하고 g_n 으로 감속하면서 속도(v_{t+1})를 갱신(단계2), p_n 을 이용하여 확률적으로 v_{t+1} 을 dc만큼 감속(단계3), 갱신된 v_{t+1} 만큼 전방으로 이동(단계4)하는 4개의 단계로 구성된다.

단계1: Noise 갱신

$$\begin{aligned} \text{If } v_t = 0 \text{ then } p_n &= p_s \\ \text{If } v_t > 0 \text{ then } p_n &= p_{noise} \end{aligned}$$

단계2: 결정론적 속도갱신

$$v_{t+1} = \min\{v_t + ac, g_n, v_{max}\}$$

단계3: 확률적(Stochastic) 감속

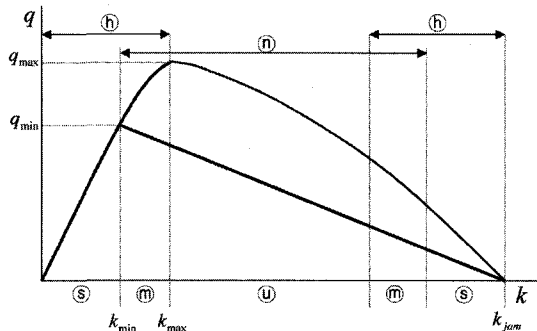
$$\begin{aligned} \text{If } v_{t+1} > 0 \text{ and } r < p_n \text{ then} \\ v_{t+1} &= v_{t+1} - dc \end{aligned}$$

단계4: 차량 이동(Movement)

$$x_{t+1} = x_t + v_{t+1}$$

2) SWP모형의 교통류 메커니즘

<그림 4>는 $v_{max} \geq 2$ 인 시스템에서 SWP모형의 개별차량행태를 통하여 설명되는 거시적 교통류 메커니즘을 보여주고 있으며, 교통류는 차량의 속도에 따라 동질적 교통류와 이질적 교통류로 구분된다. 동질적



- Ⓜ: 동질적(Homogeneous) 교통류
- Ⓝ: 이질적(Heterogeneous) 교통류
- Ⓜ: 준안정상태(Meta-stable state)
- Ⓢ: 불안정상태(Unstable state)
- Ⓢ: 안정상태(Stable state)

<그림 4> SWP모형의 교통류 메커니즘

교통류는 차량 속도가 $v = \{v_{max}, v_{max} - dc\}$ 또는 $v = \{1, 0\}$ 으로 구성되는 안정상태로, 이질적 교통류는 차량 속도가 $v = \{v_{max}, \dots, 0\}$ 으로 구성되는 불안정상태로 정의한다. 그리고 두 교통류가 공존하는 영역은 준안정상태이다.

3) SWP모형의 Noise 메커니즘

SWP모형은 Noise변수를 이용하여 개별차량의 행태와 교통류의 거시적 행태를 설명하게 되며, NaSch모형은 Noise변수로 p_{noise} , p_s 을 이용하여 교통류의 행태를 설명한다. p_{noise} 는 $v_t > 0$ 인 차량의 주행 중에 발생하는 무작위적 감속을 p_{noise} 만큼의 확률로 모사하면서 자유교통류속도(FFS, m/s)와 q_{max} 을 설명하며, p_s 는 $1 - p_s$ 의 가속확률로 정지차량의 가속과 q_{min} 을 설명한다.

자유교통류속도는 셀 길이(l_c , m)이고 $g_n \gg v_{max}$ 인 시스템에서 다음과 같이 설명되며, p_{noise} 값의 증가에 따라 자유교통류속도는 감소한다.

$$FFS = l_c \times \{v_{max} \cdot (1 - p_n) + (v_{max} - dc) \cdot p_n\}$$

NaSch모형의 Noise는 $p_{noise} = p_s$ 와 $p_{noise} \ll p_s$ 로 조합되며, $p_{noise} = p_s$ 인 경우, p_{noise} 는 <그림 4>의 q_{max} 를 설명하며, $q_{max} = q_{min}$ 으로 용량을 설명하는 역U형의 거시적 q-k관계를 설명한다. 그러나 용량감소, 역λ형 q-k관계에서 불연속적인 관계($q_{min} < q_{max}$)를 설명하지 못한다.

$p_{noise} \ll p_s$ 인 경우, p_s 는 $v_t = 0$ 인 차량에 높은 Noise값을 적용하여 혼잡(Jam)을 탈출하는 정지차량과 혼잡내 정지차량의 $1 - p_s$ 의 가속확률로 제약하여 q_{min} 을 설명한다. 따라서 혼잡의 후미에 도착하는 교통량(j_{in})이 혼잡을 탈출하는 교통량(j_{out})보다 크면 혼잡의 길이는 성장하게 되며, <그림 4>와 같이 역λ형의 거시적 q-k관계를 설명한다.

4) NaSch모형의 한계

(1) 결정론적 속도갱신의 한계

NaSch모형의 결정론적 속도갱신 규칙(단계2)은 전

방교통상황을 고려하지 않고 차량추종에 필요한 최소한의 정보인 g_n 을 이용하여 임계밀도(k_c)보다 낮은 동질적 교통류에서 $g_n \geq v_{max}$ 을 안전조건으로 모형화된다. 따라서 $v_t > 0$ 로 주행중인 차량은 $g_n = 0$ 일 경우 속도를 $v_{t+1} = 0$ 로 갱신하면서 감속과정을 경험하지 않고 비현실적으로 혼잡의 후미에 정지하게 된다. 결국 혼잡내의 밀도는 k_{jam} 에 가깝게 되기 때문에 대부분의 차량속도가 0인 잠금현상(Lockup)이 발생하고 상류부로의 혼잡전파속도는 상류부 교통량에 비례할 뿐 혼잡전파속도를 조절할 수 없다.

(2) Noise 적용의 한계

차량의 주행행태는 자유교통류, 혼잡내, 혼잡탈출의 경우에서 다르게 나타나며, 혼잡내의 운전자는 반복적으로 정지과정을 경험해야 하기 때문에 자유교통류상태나 혼잡탈출상황보다 적극적으로 가속하지 않는 경향을 보인다. 그러나 기존 NaSch모형은 $p_{noise} = p_s$ 인 경우 다양한 교통상황에서 가속행태를 동일하게 설명하며, $p_{noise} \ll p_s$ 인 경우 p_{noise} 는 $v_t > 0$ 인 차량에 적용하고, p_s 는 $v_t = 0$ 인 차량에 적용한다. 따라서 혼잡을 탈출하는 차량과 혼잡내의 차량을 구분하지 않기 때문에 p_{noise} , p_s 변수만으로는 혼잡내 $v_t = 0$, $g_n \geq 1$ 인 차량의 가속행태를 설명할 수 없다.

(3) 다양한 거시적행태 모사의 한계

거시적 교통류 행태는 <그림 1>과 같이 4가지 형태로 다양하게 보고되고 있다. 그러나 NaSch모형은 <그림 4>와 같이 역U형과 $k > k_{min}$ 인 혼잡교통류가 직선의 관계를 가지는 역λ형의 2가지 q-k관계로 거시적 행태를 설명하지만, 결정론적 속도갱신 한계와 Noise 적용의 한계로 인하여 <그림 4>에서 $k > k_{max}$ 인 이질적, 동질적 교통류를 구분하여 설명할 수 없기 때문에 종형과 $k > k_{min}$ 인 혼잡교통류가 오목(Convex) 관계를 가지는 역λ형의 q-k관계를 설명하지 못한다. 따라서 실제 모형의 적용시 정산이 용이하지 않다.

III. 모형의 개발

1. 모형의 개발방향

1990년대 초반의 컴퓨터 연산 및 메모리 기술은 오

늘날에 비하여 매우 낙후된 상태였기 때문에, 대규모 도로망을 빠르게 연산하기 위해 NaSch모형은 이산적 시공간 구조와 정수형 자료를 이용하면서 최소한의 정보인 속도(v_t)와 Spacing(g_n)을 이용하여 구축되었다. 그리고 프로그램적으로 g_n 의 정보는 v_t 인 차량의 최소한의 가속조건으로 $\min\{v_t + ac, v_{max}\}$ 만큼의 셀을 검색하도록 설계되어 전방의 교통상황을 고려하지 못하기 때문에 결정론적 속도갱신과 Noise적용의 한계를 극복하기 어려웠다.

본 연구에서는 NaSch모형의 결정론적 속도갱신의 한계를 극복하기 위하여 정지차량을 추종하는 차량의 감속과정을 모사하는 정지조작규칙(SMR: Stopping Maneuver Rule)과 Noise 적용의 한계를 극복하기 위하여 혼잡내 정지차량의 낮은 가속을 설명하는 저가속 규칙(LAR: Low Acceleration Rule)을 NaSch모형에 추가함으로써 보다 현실적으로 개별차량의 주행행태를 모사하고, 보다 다양하게 거시적 행태를 설명하도록 모형을 구축하였다.

2. 정지조작규칙(SMR)

혼잡의 후미에 도착하는 차량은 감속과정을 통하여 정지하게 되며, 혼잡을 탈출하여 하류부 혼잡의 후미에 도착하는 차량은 어느 정도 가속한 후 감속과정을 거쳐 정지하게 된다.

NaSch모형의 결정론적 속도갱신규칙(단계2)은 전방 교통상황을 고려하지 않고 $g_n > v_t$ 인 경우 v_{max} 까지 가속하게 되며, $g_n < v_t$ 인 경우 $v_{t+1} = g_n$ 으로 감속한다. 따라서 미시적으로 v_{max} 로 주행하는 차량의 $g_n = 0$ 일 경우 혼잡(Jam)의 후미에서 $v_{max} \rightarrow 0$ 으로 정지하게 되며, 혼잡을 탈출하여 인접한 하류부의 혼잡에 도착하는 차량은 $g_n \geq \sum_{i=1}^{v_{max}} i$ 인 경우 $\{v_{max}, v_{max} - dc\} \rightarrow 0$ 으로, $g_n < \sum_{i=1}^{v_{max}} i$ 인 경우 $v_t(ac \leq v_t < v_{max}) \rightarrow 0$ 으로 정지한다. 그리고 거시적으로 <그림 2>와 같이 혼잡과 비혼잡이 혼재된 이질적 교통류의 교통량을 높게 설명하게 된다.

SMR규칙은 미시적으로 전방의 교통상황을 고려함으로써 감속과정을 통하여 혼잡의 후미에 도착하는 과정과 혼잡을 탈출하여 하류부의 인접한 혼잡에 도착하는 차량의 감속을 모사하고, 거시적으로 혼잡이 발생하

는 이질적 교통류의 q-k관계를 설명한다.

차량 ($v_i > 0$)은 감속을 수행하면서 정지차량의 후미에 도착하기 위해서는 충분한 정지거리 (d_s , 셀)가 필요하며, d_s 는 다음과 같이 정의한다.

$$d_s = \sum_{i=1}^k i + \alpha, \quad k = \{v_i + ac, v_{max}\}$$

여기서, $\alpha (\geq 1)$ 는 d_s 조정상수

<그림 5>는 SMR규칙의 정지과정을 보여주고 있으며, 정지과정은 비가속 단계와 감속단계로 구성된다. 비가속 단계에서 속도가 $v_i > 0$ 인 차량은 가속하지 않고 $v_{i+1} = \{v_i, v_i - dc\}$ 로 주행하게 되며, 감속단계에서 $v_{i+1} = v_i - dc$ 로 감속하게 된다.

감속단계에서의 Noise변수는 $p_{sm} (p_{noise} \leq p_{sm} \leq 1.0)$ 을 이용하며, 강압적 감속과정이므로 p_{sm} 는 0.9 이상의 높은 값을 이용한다. SMR규칙의 단계별 Noise는 다음과 같이 갱신된다.

If $g_n \leq v_i$ then

If $d_j \geq s_u$ then

$$p_n = p_{sm}$$

여기서, $d_o = \sum_{i=1}^k i$, $k = \{v_i + ac, v_{max}\}$

$$d_j = \sum_{i=1}^{v_i} i + \beta, \quad d_o \geq d_j, \quad \beta \geq 0$$

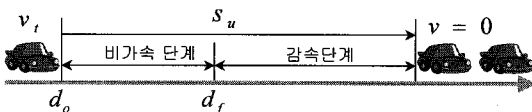
s_u : 전방의 d_s 범위내에 있는 첫번째 정지 차량까지 비 점유된 셀의 개수

정지과정에서 차량은 등속 또는 감속해야 하기 때문에 결정론적 속도갱신 규칙은 다음과 같다.

If $g_n \leq v_i$ then

If $d_o \geq s_u$ then

$$v_{i+1} = \min\{v_i, g_n, v_{max}\}$$



<그림 5> SMR규칙의 차량감속과정

3. 저가속규칙(LAR)

<그림 5>에서 k_{jam} 의 밀도에 가까운 동질적 교통류에 존재하는 차량의 가속행태는 혼잡을 탈출하는 차량의 가속행태와 다르게 나타나며, 가속의 정도는 매우 낮다. 그러나 NaSch모형은 정지차량에 대하여 p_s 변수를 동일하게 적용하기 때문에 미시적으로 혼잡내에 차량의 낮은 가속을 설명하지 못하며, 거시적으로 k_{jam} 에 가까운 밀도에서의 동질적 교통류를 설명할 수 없다.

이러한 혼잡내 정지차량의 낮은 가속을 설명하기 위하여 Noise변수 $p_{lar} (p_{lar} \geq p_s)$ 를 이용한 LAR규칙은 미시적으로 혼잡내 정지차량의 가속을 $1 - p_{lar}$ 의 확률로 모사하면서 거시적으로 k_{jam} 에 가까운 밀도에서의 동질적 교통류를 설명하게 되며, 혼잡을 탈출하는 정지차량의 가속을 $1 - p_s$ 의 확률로 설명하는 p_s 와는 다음과 같이 구분된다.

If $v_i = 0$ then

If $g_n = 1$ and $v_i = 0$ then

$$p_n = p_{lar}$$

Else $p_n = p_s$

여기서, v_i : 선행차량의 속도

속도(v_i) = {0,1}으로 구성된 k_{jam} 에 가까운 동질적 교통류의 밀도(k_i)의 속도(v_h , m/s)는 $1 - k_i$ 의 차량이 $1 - p_{lar}$ 의 확률로 속도를 갱신하게 되므로 다음과 같이 계산된다.

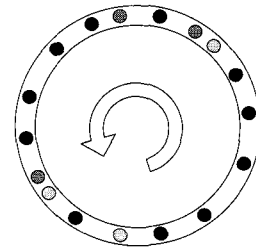
$$v_h = l_c \times (1 - k_i) \times (1 - p_{lar})$$

4. 구축된 SWP모형

SMR규칙과 LAR규칙은 NaSch모형에 다음과 같이 결합되며, SMR규칙은 단계1, 2에 추가되며, LAR규칙은 단계1에 추가된다.

〈표 2〉 구축모형의 Noise 조합 형태

p_{noise}	p_s	p_{sm}	p_{lar}	Noise 조합형태
$p_{noise} = p_s$	$p_{noise} =$	$p_{noise} =$		1
	$p_{noise} <$	$p_s <$		2
$p_{noise} \ll p_s$	$p_{noise} =$	$p_s =$		3
	$p_{noise} <$	$p_s <$		4



〈그림 6〉 모의실험 링크

단계1: Noise 갱신

$$p_n = p_{noise}$$

If $v_t = 0$ then

If $g_n = 1$ and $v_t = 0$ then

$$p_n = p_{lar}$$

Else $p_n = p_s$

If $v_t > 0$ then

If $g_n \geq v_t$ and $d_f \geq s_u$ then

$$p_n = p_{sm}$$

단계2: 결정론적 속도갱신

If $v_t > 0$ and $d_o \geq s_u$ then

$$v_{t+1} = \min\{v_t, g_n, v_{max}\}$$

Else

$$v_{t+1} = \min\{v_t + ac, g_n, v_{max}\}$$

단계3: 확률적(Stochastic) 감속

If $v_{t+1} > 0$ and $r < p_n$ then

$$v_{t+1} = v_{t+1} - dc$$

단계4: 차량 이동(Movement)

$$x_{t+1} = x_t + v_{t+1}$$

SMR규칙과 LAR규칙은 Noise 변수값에 따라서 〈표 2〉와 같이 4가지 형태로 조합된다. 형태 1, 3은 NaSch모형과 동일하며, 형태 2, 4는 NaSch모형에 SMR규칙과 LAR규칙이 추가된 형태이다.

N. 모의실험 및 평가

1. 평가방법 및 모의실험 환경

본 연구에서는 구축된 SWP모형의 4가지 Noise 조

합형태를 모의실험 기법을 이용하여 미시적·거시적으로 분석하도록 한다. SWP모형은 개별차량의 행태를 간략하게 묘사하여 거시적 행태를 설명하기 때문에 미시적 분석은 차량계적 시공도를 이용하여 간략하게 분석하며, 거시적 분석은 $q-k$ 관계를 이용하도록 한다.

모의실험은 〈그림 6〉과 같은 무한원형링크에서 수행하였으며, 시스템조건은 셀길이 $7m(k_{jam} \approx 143\text{대/km})$, 셀개수 1,430($\approx 10\text{km}$)개, $v_{max} = 5(\text{셀/초})$ 이다. Noise조건은 $p_{sm} = 0.95$, $p_{lar} = 0.8$ 이며, 형태 1, 2의 경우 $p_{noise} = p_s = 0.135$, 형태 3, 4의 경우 $p_{noise} = 0.135$, $p_s = 0.5$ 로 설정하였다.

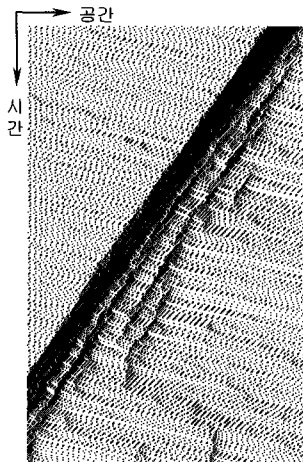
모의실험은 1~1,430(대/10km)의 밀도로 1,430가지의 경우에 대하여 1시간씩 수행되었으며, 시뮬레이션 시작($t=0$) 초에서 차량은 차량간의 차간거리(g_n)가 최대 1셀의 오차로 균일하게 배정된다.

프로그램은 객체지향 언어인 C++를 이용하였으며, 연산환경은 Pentium3, CPU 640 MHZ, SD RAM 128 MB, HDD 20 GB이다.

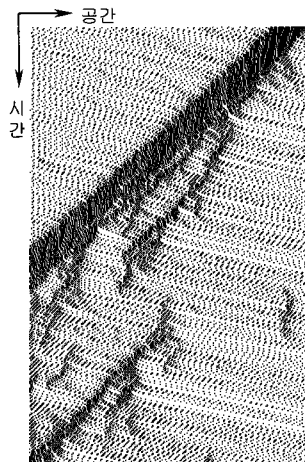
2. 모의실험 결과

1) 미시적 분석

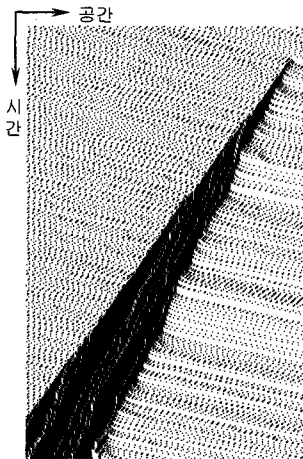
〈그림 7〉~〈그림 10〉은 시공간으로 변화하는 개별 차량의 궤적을 Noise 조합형태별로 보여주고 있으며, 상류부 유입교통량은 2,250(대/시)으로 $p_{noise} = 0.135$, $v_{max} = 5$ 에서의 q_{max} 와 동일하다. Noise 조합형태 1, 3인 〈그림 7〉, 〈그림 9〉의 경우 차량은 감속과정을 경험하지 않고 혼잡의 후미에 도착하고 있기 때문에 혼잡내 거의 대부분의 차량속도가 0으로 되는 잠금현상이 발생하고 있다. 그러나 SMR규칙과 LAR규칙이 적용된 Noise 조합형태 2, 4인 〈그림 8〉, 〈그림 10〉의 경우에서 차량은 감속과정을 통하여 혼잡의 후미에 도



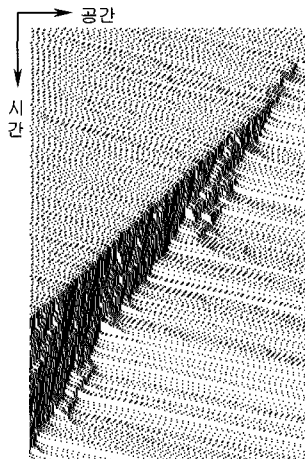
〈그림 7〉 Noise 조합형태1의 차량계적 시공도



〈그림 8〉 Noise 조합형태2의 차량계적 시공도



〈그림 9〉 Noise 조합형태3의 차량계적 시공도



〈그림 10〉 Noise 조합형태4의 차량계적 시공도

착하고 있으며, 혼잡내에서 저속주행을 하게됨으로써 잠금현상이 발생하지 않는다.

$p_{noise} = p_s$ 인 Noise 조합형태 1, 3의 경우 $j_{in} \approx q_{max} \approx j_{out}$ 의 관계를 갖기 때문에 혼잡의 길이는 성장하지 않으면서 상류부로 이동하고 있으며, $p_{noise} \ll p_s$ 인 Noise 조합형태 2, 4의 경우 $j_{in} > j_{out}$, $q_{min} < j_{in} \leq q_{max}$ 의 관계를 갖기 때문에 혼잡의 길이는 성장하면서 상류부로 이동하고 있다.

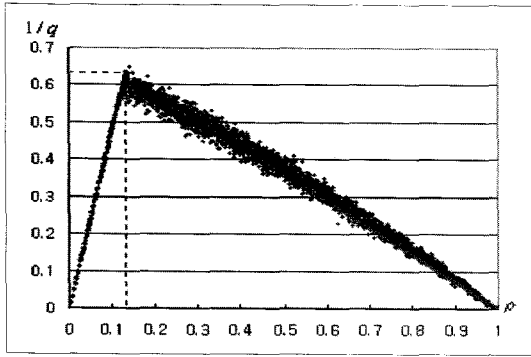
Noise 조합형태 1, 3의 경우 혼잡내의 밀도는 k_{jam} 에 가까운 높은 밀도로 상류부 교통량에 비례하여 상류부로 전파되고 있으며, Noise 조합형태 2, 4의 경우 혼잡내 밀도와 혼잡전파 속도는 Noise 조합형태 1, 3의 혼잡내 밀도보다 낮은 밀도와 빠른 속도로 상류부로

전파되고 있다.

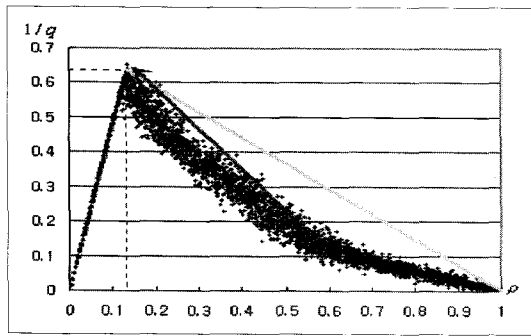
모의실험결과 Noise 조합형태 1,3의 경우 혼잡내 밀도는 약 0.97로, 2, 4의 경우는 혼잡내 밀도는 약 0.61로 분석되었다. 조합형태 1, 3은 결정론적 속도경신의 한계로 인하여 혼잡내 밀도가 높게 나타나며 혼잡내에서 잠금현상을 보이게 된다. 그러나 조합형태 2, 4의 경우 SMR규칙에 의하여 혼잡후미 도착시 p_{sm} 의 확률로 전방정지차량과의 1개의 gap을 확보하게 되고, LAR규칙에 의하여 혼잡내에서 $1 - p_{lar}$ 의 확률로 저속 주행하기 때문에 혼잡내 밀도는 낮다.

2) 거시적 분석

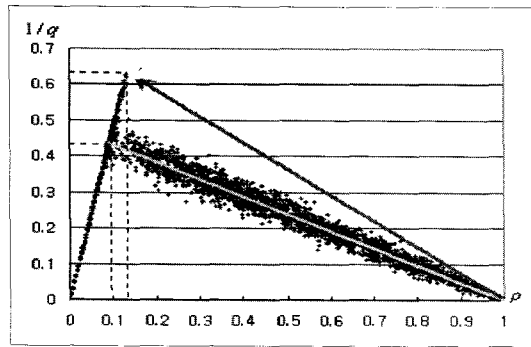
〈그림 11〉~〈그림 14〉는 Noise 조합형태별 $q - k$



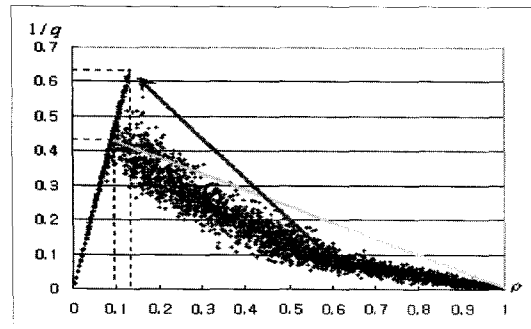
〈그림 11〉 Noise 조합형태1의 $q-k$ 관계



〈그림 12〉 Noise 조합형태2의 $q-k$ 관계



〈그림 13〉 Noise 조합형태3의 $q-k$ 관계



〈그림 14〉 Noise 조합형태4의 $q-k$ 관계

관계를 보여주고 있으며, q (교통량, 대/5분), ρ (밀도, k/k_{jam})이다.

Noise 조합형태 1인 〈그림 11〉은 $q_{max} \approx 2,250$ 대/시(=0.625*3,600)에서 역U형의 형태로 거시적 관계를 설명하고 있다. Noise 조합형태 2인 〈그림 12〉는 조합형태 1과 동일한 q_{max} 을 설명하고, 밀도 k_{min} 이상의 혼잡교통류를 오목(Convex)하게 설명하면서 중형의 $q-k$ 관계를 보이고 있다.

Noise 조합형태 3, 4인 〈그림 13〉, 〈그림 14〉는 q_{max} 와 q_{min} (1,500=0.43*3,600)의 관계를 $q_{max} \approx 1.5 \times q_{min}$ 로 설명하면서 역λ의 형태로 거시적 관계를 설명하고 있다. 조합형태 3은 밀도 k_{min} 이상의 혼잡교통류를 직선으로 설명하고, 조합형태 4는 오목하게 설명한다.

그리고 교통량이 q_{max} 일 경우 Noise 조합형태 2, 4의 혼잡전파속도(λ)는 Noise 조합형태 1, 3보다 높게 나타나고 있어 SMR규칙과 LAR규칙을 이용하여 혼잡의 밀도와 혼잡의 전파속도를 설명할 수 있음을 보여주고 있다.

V. 결론 및 향후연구

본 연구에서는 NaSch모형에 SMR과 LAR규칙을 Noise 갱신, 결정론적 속도갱신에 추가함으로써 개별 차량의 행태를 보다 현실적으로 설명하면서 다양한 거시적 교통류행태를 모사할 수 있음을 보였다. 미시적 및 거시적 측면, 연산수행속도 측면에서 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

첫째, 비현실적인 정지($v_{max} \rightarrow 0$), 혼잡내에서 지나치게 높은 정지차량의 가속능력 등 NaSch모형의 비현실적인 한계를 추가적인 Noise 변수(p_{sm}, p_{lar})를 고려하여 일련의 주행과정(주행-감속-정지-저속주행-혼잡탈출-가속-주행)을 보다 현실적으로 모사하고 혼잡내 밀도가 매우 높아 발생하는 잠금현상을 방지하였다.

둘째, Noise변수(p_{sm}, p_{lar})을 이용하여 NaSch모형이 설명하지 못한 혼잡내의 밀도 및 혼잡의 전파속도를 설명하고, 종(Bell)형과 혼잡교통류의 $q-k$ 가 오목한 역λ형 거시적 $q-k$ 관계를 설명함으로써 〈그림 1〉의 4가지 다양한 교통류를 구현하였다.

셋째, 1,023,165(= $\sum_{i=1}^{1340} i$)대의 차량을 한시간 동

안 모의실험하는데 1,033초가 소요되어 실시간보다 약 3.48($\approx 3,600 / 1,033$)배 빠른 연산수행속도를 보였다.

본 연구에서 구축된 SWP모형을 실제 대규모 고속도로망 모의실험에 적용하기 위해서는 다음과 같은 향후연구가 수행되어야 한다.

첫째, 본 연구에서 적용한 셀길이는 7m로 차량의 가속량은 7.0m/sec에 달한다. 따라서 정지차량은 약 5~6초 후에 120kph 이상의 속도에 도달하기 때문에 가속을 지나치게 높게 설명한다. Schreckenberg (2002)는 셀길이를 1.5m로 적용하였으며, 이것은 단위가속도 1.5%²으로서 120kph에 도달하는 시간은 약 22초가 소요된다. 이렇게 셀길이를 작게하면 가감속의 정도를 보다 세밀하게 모사할 수 있지만 전방의 셀에 대한 검색범위가 증가되어 SWP모형의 장점인 대규모 네트워크의 빠른 연산수행속도를 저하시킬 수 있다. 따라서 구축된 모형을 실제 고속도로망 모의실험에 적용하는 과정을 통하여 모형의 연산수행속도와 실시간 모의실험 범위를 고려한 적정 셀길이를 도출하여야 할 것이다.

둘째, 본 연구에서 구축한 SWP모형의 추가규칙에 적용된 Noise변수인 p_{sm} 과 p_{lar} 변수값은 셀길이가 변화하게 되면 다시 조정되어야 한다. 따라서 적정 셀길이가 도출되면 실측자료와 실험을 통하여 본 연구에서 구축한 SWP모형의 추가규칙의 적정 변수값을 도출해야 할 것이다.

셋째, 본 연구에서는 1차로의 모의실험 링크에서 차량추종모형을 이용하여 교통류의 행태를 설명함으로써 차로변경에 대한 영향을 고려하지 않았다. 따라서 차량 추종과 차로변경모형을 유기적으로 통합하는 연구를 통하여 연속류의 다양한 행태를 설명하는 연구가 수행되어야 한다.

참고문헌

1. 조중래·김진구·고승영·김채만(2001), "CA모형을 이용한 미시적 교통류 시뮬레이션 시스템 개발에 관한 연구", 대한교통학회지, 제19권 제3호, 대한교통학회, pp.133~144.
2. 천승훈·노정현(2001), "CA(Cellular Automata) 모형을 이용한 고속도로 돌발상황 영향 분석 교통 시뮬레이션 모형 개발", 대한교통학회지, 제19권 제6호, 대한교통학회, pp.219~227.
3. 박상조(2001), "교통류 시·공간 분석을 통한 혼잡교통류 해석", 서울대학교 박사논문.
4. 장현호·백승걸·박재범(2002), "CA모형을 이용한 혼잡교통류 해석에 관한 연구", 대한교통학회 2002 추계학술대회.
5. 장현호·이승재(2003), "CA모형을 이용한 단기 구간통행시간 예측에 관한 연구", 대한교통학회지, 제21권 제1호, 대한교통학회, pp.91~102.
6. 장현호·백승걸·박재범(2003), "CA기반 실시간 고속도로망 시뮬레이션 개발", 대한교통학회 2003 추계학술대회.
7. 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.
8. 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.
9. Benjamin S.C., Johnson N.F. and Hui P.M.(1996), J. Phys. A29, 3119.
10. 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.
11. Edie L. C. and Foote R. S.(1958), "Traffic Flow in Tunnels", Proceedings of the Highway Research Board, 37, pp.334~344.
12. Edie L. C. and Foote R. S.(1961), "Experiments on Single Lane Traffic Flow in Tunnels", Theory of Traffic Flow Proceedings, pp.175~192.
13. Kerner B. S.(1999), "Phase Transitions in Traffic Flow", Traffic And Granular Flow '99", Springer, pp.253~283.
14. Koshi M., Iwasaki M. and Ohkura I. (1981), "Some findings and an overview on vehicular flow characteristics", Proceedings of the eight international sym-

- posium on transportation and traffic flow theory, pp.403~426.
15. Krauss S.(1997), "Microscopic Traffic Simulation: Robustness of a Simple Approach", Traffic And Granular Flow '97", Springer, pp.269~283.
 16. Nagel K. and Schreckenberg M. (1992), "A Cellular automaton model for freeway traffic", Journal of Physics I 2, pp.2221~2229.
 17. Nagel K., Stretz P., Pieck M., Leckey S. and Donnelly R., C L Barrett(1999), TR ANSIMS traffic flow characteristics
 18. Nagel k. et al, "TRANSIMS traffic flow characteristics", LA-UR 97-3530.
 19. Schreckenberg M.(2002), "Simulation of the Autobahn Traffic in North Rhine-West phalia", International Symposium on Transport Simulation, pp.193~200.
 20. Takayasu M. and Takayasu H.(1993), "Phase transition and 1/f type noise in one dimensional asymmetric particle dynamics". Fractals, 1(4), pp.860~866.

✉ 주 작 성 자 : 장현호

✉ 논문투고일 : 2004. 4. 8.

논문심사일 : 2004. 5. 25 (1차)

2004. 7. 1 (2차)

2004. 7. 9 (3차)

심사판정일 : 2004. 7. 19

✉ 반론접수기한 : 2004. 12. 31