

■ 論 文 ■

# CA모형을 이용한 미시적 교통류 시뮬레이션 시스템 개발에 관한 연구

A Traffic Flow Micro-simulation System Using Cellular Automata

**조 중 래**  
(명지대학교 교통공학과 교수)

**김 진 구**  
(명지대학교 교통공학과 석사과정)

**고 승 영**  
(명지대학교 교통공학과 교수)

**김 채 만**  
(명지대학교 교통공학과 박사과정)

## 목 차

- I. 서론
  - II. Cellular Automata모형에 기반을 둔 차량  
행태모형의 이론적 고찰
    - 1. 기본개념 및 용어정의
    - 2. 차량추종모형
    - 3. 차로변경모형
  - III. 시뮬레이션 모형 개발
    - 1. 시뮬레이션 모형 구성 모듈
    - 2. 네트워크 구조
    - 3. 네트워크 및 차량 생성 모듈
    - 4. 차량전이모듈
  - IV. 모의실험
    - 1. 가로망 구성 및 데이터 구조
    - 2. 모의실험 분석결과
  - V. 결론 및 향후과제
- 참고문헌

Key Words : 교통류 시뮬레이션, 미시적 시뮬레이션, 차량행태모형, CA모형, O/D 경로분석

## 요 약

본 연구에서는 대규모 네트워크에 적용 가능한 미시적 교통류 시뮬레이션 모형을 개발하였다. 본 연구는 대규모 가로망에 대한 미시적 교통류 시뮬레이션 시스템개발의 첫 번째 단계로, 연속류 구간을 중심으로 우리나라의 가로망 구조, 차량 주행행태에 적합한 미시적 교통류 시뮬레이션 모형개발에 초점을 두었다. 차량 전이 모형으로는 Cellular Automata모형(CA모형)을 기반으로 하였으며, 기존의 CA모형 중 교통공학측 측면에서 문제가 있다고 판단되는 부분에 대해서는 새로운 모형을 개발하거나 수정하여 적용하였다. 개발된 모형의 모의실험을 통해 기존의 거시적 교통류 시뮬레이션 모형에서 설명할 수 없었던 여러 교통현상(합류, 차로축소, 분류등으로 유발되는 교통현상)을 설명할 수 있는 것으로 확인되었고, 또한 본 모형은 우리나라의 가로망구조에 기반을 두고 개발되었기 때문에 기존에 외국에서 개발된 미시적 시뮬레이션 모형이 표현하지 못했던 가로망에 대한 교통류 시뮬레이션이 가능한 것으로 나타났다.

## 1. 서론

지금까지 개발되어 교통분야에서 널리 활용되고 있는 거시적 교통류 시물레이션 모형은 오늘날 날로 복잡해지는 교통현상을 정확하게 이해하고, 효율적인 교통정책을 수립하기에는 많은 한계점을 내포하고 있다. 또한 새로운 교통문제 해결방안으로 대두되고 있는 첨단교통체계(ITS)의 효과분석이나, 교통환경정책 수립을 위한 교통 대기오염 분석은 거시적 교통류 시물레이션 모형을 통해서서는 불가능한 상황이다. 이러한 상황적 요구와 거시적 교통류 시물레이션 모형이 갖는 한계점을 극복하기 위하여 현재 여러 교통선진국들에서는 차량행태모형에 기초를 둔 대규모 네트워크 미시적 교통류 시물레이션 모형 개발을 추진하고 있는 상황이며, 이미 미국의 경우 TRANSIMS, MITSIM, INTEGRATION 등의 여러 시물레이션 모형이 개발되어 실용화 과정에 있다.

그러나 외국에서 개발된 미시적 교통류 시물레이션 모형은 우리나라의 가로망구조, 차량행태등을 고려하지 않고 개발되었기 때문에 실제 우리나라에 적용할 경우 충분한 분석효과를 거둘 수 없는 것이 현실이다. 이러한 현실을 극복하기 위해 본 연구에서는 우리나라의 가로망 구조, 차량행태에 맞는 미시적 교통류 시물레이션 모형개발에 초점을 두고 수행하였으며, 또한 기종점(O/D)교통량에 기반을 둔 미시적 시물레이션모형으로 O/D별 통행시간, 경로선택을 위한 통행행태 분석이 가능하도록 개발하였다.

본 연구에서 개발한 기종점기반 미시적 교통류 시물레이션은 1992년 Nagel K. and Schreckenberg M.에 의해 발표된 Cellular Automata모형을 이용한 교통류 시물레이션 모형을 기초하였다.

Cellular Automata 모형은 가로망을 차량한대 점유할 수 있는 cell단위로 나눈 다음, cell 내부의 차량점유상태에 따라 간단한 수학적 모형 즉, 차량추종모형과 차로변경모형을 적용하여 개별 차량들을 연속적으로 업데이트 시키면서 차량흐름을 확산시키는 개념을 지닌 모형으로 여러 교통현상의 분석에 있어 짧은 Computing Time을 요구하고, 차량을 움직임을 그래픽으로 나타낼 경우 차량의 cell 점유상황정보 [0,1]과 속도정보만을 가지고 그래픽 표현이 가능하므로 다른 미시적 모형에 비하여 적은 Computing Memory를 필요로 한다. 또한 여러 교통상황 및 가

로망구조에 맞는 다양한 모형을 적용시킬 수 있는 구조를 지니고 있어 대규모 네트워크를 미시적으로 시물레이션 하는데 타당한 모형이다.

본 연구는 Cellular Automata모형에 기반을 두고 이제까지 개발된 차량추종모형(Car-Following Theory), 차로변경모형(Lane-Changing Model)을 이용하여 대규모 네트워크에 적용 가능한 미시적 교통류 시물레이션 모형을 개발하는 첫 번째 단계로 연속류 구간을 중심으로 이루어졌으며, 모의실험을 통하여 모형의 결과를 검증하였다. 현재까지 개발된 모형은 현재 우리나라 모든 연속류 가로망에 대해 시물레이션이 가능하도록 개발되었고, 특히 합류/분류구간에서의 운전자행태를 "있는 그대로"설명하는데 초점을 두고 개발하였다. 또한 기존 Cellular Automata모형기반 차량행태모형과 새로 개발한 차량행태모형을 링크구간별로 세부적으로 적용하였으며, 교통전문가가 차량행태모형에 영향을 미치는 값을 입력할 수 있는 구조를 지니도록 개발하였다.

## II. Cellular Automata모형에 기반을 둔 차량행태모형의 이론적 고찰

Cellular Automata모형에 기반을 둔 차량행태모형은 1992년 Nagel K. and Schreckenberg M.에 의해 처음 시도되었으며 현재까지 활발한 연구가 진행되고 있는 실정이다.

### 1. 기본개념 및 용어정의

Cellular Automata에 기반을 둔 차량행태모형은 기본적으로 Cellular Automata모형에서 기본개념을 가져 왔지만 교통분야에 접목을 시키기 위하여 많은 부분이 수정되어 개발되었다.

차량행태모형에 사용된 cell의 공간적 구조는 차량한대가 점유할 수 있는 공간, 즉 차량길이와 최소 차두거리에 의해 결정되며, cell의 상태값은 차량점유상황에 따라 (0,1)의 값을 갖는다. 그리고 cell을 점유한 각 차량들은 하나의 속성값을 갖게 되는데, 이는 속도를 의미한다. 이 때의 속도는 일반적으로 사용되는 m/s나 km/h의 값이 아니라 cell/s로 표현되며, 0~5cell/s의 범위값을 갖게 된다. 5cell/s의 값은 차량이 가질수 있는 최대속도를 뜻하며 일반적인 cell

길이 7m를 적용할 경우 130km/h에당되는 속도이다.

## 2. 차량추종모형

### 1) 기본전제

차량은 기본적으로 차량이 가질 수 있는 최대속도 까지 가속하기를 원하며, 전방차량과의 차두거리와 감속확률에 따라 속도를 결정된다.

### 2) 세부내용

- Step 1 : 가속(Acceleration)
  - $v \rightarrow \min[v+1, v_{\max}]$
  - 차량은 자신이 가질 수 있는 최대속도보다 현재 속도가 작다면 가속을 한다.
- Step 2 : 감속(Slowing Down)
  - $v = \min[v, gap_{\text{same}}]$
  - 전방차량과의 거리가 상호 영향을 미칠 수 있는 범위 안에 존재하면, 전방차량과의 gap만큼 자신의 속도를 감속한다.
- Step 3 : 불규칙적인 감속(Randomization) with 확률  $\rho$ 
  - $v = \min[v-1, 0]$  with  $\rho$
  - 차량은 확률  $\rho$ 를 가지고 자신의 속도를 1만큼 감속한다.
- Step 4 : 이동(Car Motion)
  - New cell = Current cell + v
  - 차량은  $v$ 의 속도를 가지고 전방으로 움직인다.

여기서,

- $v$  : 차량속도(cell/s)
- $v_{\max}$  : 차량이 가지는 최대속도(cell/s)
- $gap_{\text{same}}$  : 주행차로 전방 차두거리(cell)
- $\rho$  : 차량이 불규칙적으로 감속하는 비율
- New cell : 다음시간 차량의 점유셀
- Current cell : 현재시간 차량의 점유셀

## 3. 차로변경모형

### 1) 기본개념

차량들은 현재 주행하고 있는 차로에서 자신이 희망

하는 속도를 얻을 수 없을 경우에 차로변경을 원하며, 차로변경 대상차로에 충분한 안전거리가 확보되어 있으면 차로변경을 수행한다.

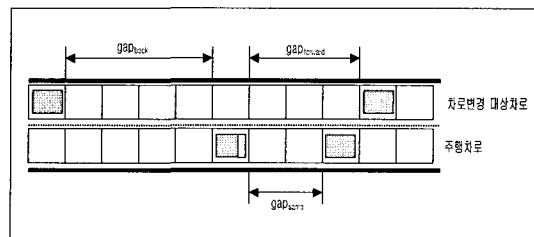
### 2) 세부내용

- Step 1 : 선호조건(Incentive)
  - 현재 주행차로에서 차량이 희망하는 속도를 내지 못할 경우 차량은 기본적으로 차로변경을 희망한다.
  - $v_{\text{hope}} > gap_{\text{same}}$  and  $gap_{\text{forward}} > gap_{\text{same}}$ ,
  - $v_{\text{hope}} = \min(v+1, v_{\max})$
- Step 2 : 안전조건(Safety)
  - 선호조건이 만족되었다 하더라도 차로변경 대상차로에 대한 안전성이 확보된 경우에만 차량이 차로변경을 수행할 수 있다.
  - $gap_{\text{forward}} > v$  and  $gap_{\text{back}} \geq v_{\max}$
  - $gap_{\text{back}} \geq v_{\max}$ 의 조건은 차량이 후방차량의 속도를 알지 못한다는 가정을 전제로 한 것이고,  $v \leq gap_{\text{forward}}$ 의 조건은 차량이 차로변경을 완료한 후 차량 전이시 갑작스런 감속을 방지하기 위한 조건이다.

여기서,

- $v_{\text{hope}}$  : 희망속도(cell/s)
- $gap_{\text{same}}$  : 주행차로 전방 차두거리(cell)
- $gap_{\text{forward}}$  : 차로변경 대상차로 전방 차두거리 (cell)
- $gap_{\text{back}}$  : 차로변경 대상차로 후방 차두거리 (cell)

차로변경은 위의 모든 조건을 만족하여야만 할 수 있으며, 하나의 조건이라도 만족하지 않을 경우에는 차로변경을 하지 못한다. 아래 <그림 1>  $gap_{\text{same}}$ ,  $gap_{\text{forward}}$ ,  $gap_{\text{back}}$ 의 예를 보여주는 예이다.

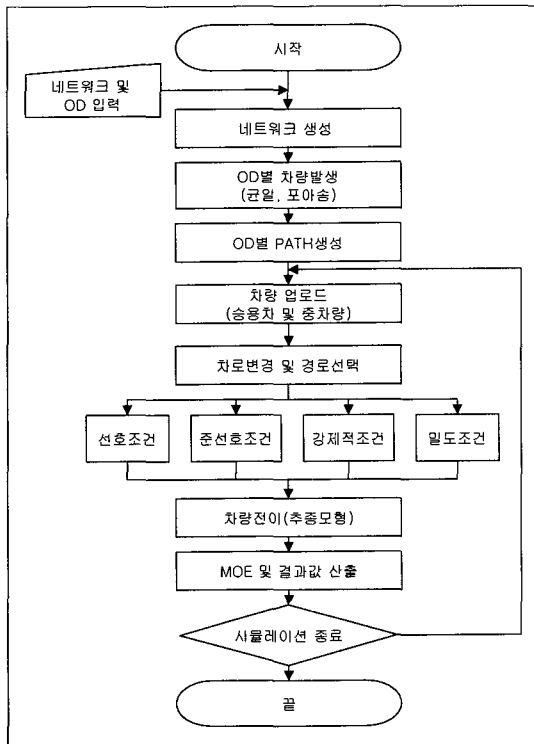


<그림 1>  $gap_{\text{same}}$ ,  $gap_{\text{forward}}$ ,  $gap_{\text{back}}$ 의 예

### III. 시뮬레이션 모형 개발

#### 1. 시뮬레이션 모형 구성 모듈

모형의 구성은 네트워크 생성 모듈, O/D별 차량발생 모듈, O/D별 PATH 생성 모듈, 차량 링크 부하 모듈, 차로변경 모듈, 차량전이 모듈, 그리고 결과값 생성모듈로 구성되어 있다. <그림 2>는 시뮬레이션 모형의 전체적인 흐름도를 보여준다.



<그림 2> 시뮬레이션 흐름도

#### 2. 네트워크 구조

본 연구에서 개발한 미시적 교통류 시뮬레이션 모형은 개별차량을 1초단위로 시뮬레이션하는 미시적 모형이기 때문에 기본적으로 거시적 시뮬레이션 모형에 비해 많은 네트워크 입력자료를 요구한다. 하지만 cell기반 모형이기 때문에 다른 미시적 시뮬레이션 모형과 같은 복잡한 자료입력구조를 지니지는 않는다.

네트워크의 구성은 일반적 시뮬레이션 모형과 마찬가지로 링크와 노드로 구성되어지며, 본 연구에서 개

<표 1> 노드 Type

노드 Type	설 명
1	차량발생노드
2	연결노드: 차로축소 및 확대, 부가차로설치, Toll, 구간
3	분류노드
4	합류노드
5	분기노드

<표 2> 링크 Type

링크 Type	설 명
0	연결구간(본선연결구간)
1	본선
2	본선+감속차로
3	본선+부가직진차로
4	본선+부가직진차로+가속차로
5	본선+가속차로
6	진출 Ramp
7	진입 Ramp
8	본선분기구간
9	본선분기구간+감속차로
10	엇갈림구간
11	TOLL 입구
12	TOLL 출구

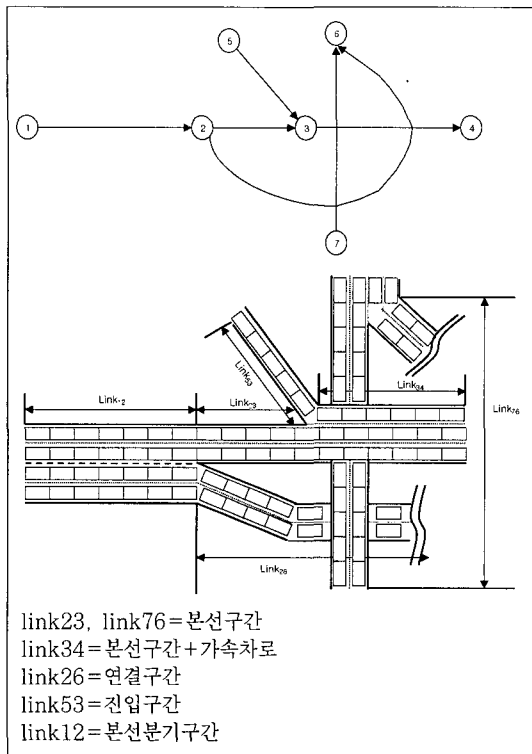
발한 시뮬레이션 모형이 cell을 기반으로 구축된 모형이기 때문에 링크는 다시 cell로 나누어진다. 노드는 링크간의 차로가 서로 상이할 경우의 연결노드, 차량이 발생되어지는 발생노드, 차량의 합류 및 분류가 이루어지는 분류노드, 합류노드 그리고 본선이 완전히 분기되는 본선분기노드로 구분하였으며, 링크는차로조합형태와 분류 및 합류형태에 따라 12 Type으로 구분하였다. 다음 <표 1>, <표 2>는 각각 노드 Type과 링크 Type를 설명한 것이다.

<그림 3>은 본 연구에서 사용한 시뮬레이션 네트워크 구조의 예를 보여주는 그림이다.

#### 3. 네트워크 및 차량 생성 모듈

##### 1) 네트워크 생성 모듈

네트워크는 분석대상 구간의 노드 및 링크입력자료를 바탕으로 시뮬레이션 기본단위인 링크단위로 생성



〈그림 3〉 [본선분기+본선연결] 네트워크의 예

된다. 본 연구에서 개발한 시뮬레이션 모형은 cell기반의 모형이기 때문에 네트워크는 길이의 함수값을 가지는 링크가 아니며, 초기 입력값인 cell의 공간적 길이에 따라 cell단위로 분리되는 cell조합 링크형태로 생성된다.

링크는 기본본선구간, 감가속차로가 설치된 합류 및 분류구간, 교차하는 본선을 연결하는 연결구간으로 분리하였으며, 차로가 축소 또는 확장되는 구간에서는 Dummy 노드로 링크를 분리시켜 서로 다른 링크 구조를 지니도록 하였다.

2) O/D별 차량발생

본 연구에서 시뮬레이션을 위해 사용되는 O/D는 시간단위의 차종별 O/D로, 차종은 하나의 cell만을 점유하는 승용차와 두 cell을 점유하는 중차량으로 구분하였다. 그리고 차량을 발생할 때 차량이 가질수 있는 최대속도값도 차종별로 분리하여 설정하도록 모형화 하였다.

O/D별 차량발생은 시뮬레이션 기본시간인 초(sec) 단위별로 정수형태로 발생되며, 균일분포와 포아송분

포 함수식을 이용하여 발생시켰다.

아래내용은 O/D별 차량발생에 사용된 분포식을 보여준다.

- 균일분포

$$x = \frac{1}{OD\_v}$$

여기서,

x : headway(초)

od\_v : 출발지노드가 같은 교통량의 합

- 포아송분포

$$x = \frac{\ln(U)}{-\lambda}$$

여기서,

x : headway(초)

U : [0.1]사이의 Random 값

λ : 평균 headway의 역수

중차량은 O/D별 중차량비율을 입력자료로 받아 Random값을 이용하여 발생시켰다.

3) O/D별 PATH생성

O/D별 PATH는 출발지노드와 도착지노드를 기준으로 생성되어지며, 현재 개발된 모형의 경우 연속류만을 시뮬레이션 할 수 있도록 개발되었기 때문에 기본적으로 O/D별로 단일 PATH만을 가지게 된다. 향후 단속류에 대한 모형개발을 수행할 때에는 차량이 링크를 통행하면서 동적경로선택(Dynamic Route Choice)이 가능하도록 개발할 예정이다.

4) 차량 부하(Upload)

O/D별로 발생된 차량은 차량발생링크에 차로별로 부하시키기 위하여 기본적 부하원칙은 차량의 발생이 현재 부하가능 차로수보다 많을 경우에는 차량의 발생누적순서 따라 Random값을 이용하여 차로에 부하였으며, 차량의 발생이 부하가능 차로수보다 적을 경우에는 중차량은 바깥차로부터, 일반승용차는 Random값을 이용하여 차로에 부하였다.

#### 4. 차량전이 모듈

##### 1) 적용모형

차량전이를 위해 사용되는 모형은 크게 추종모형과 차로변경모형으로 구분되며, 본 연구에서 적용한 모형은 기존에 개발된 Cellular Automata 모형 기반 차량행태모형을 기준으로 하였으며, 교통공학 적 측면에서 문제가 있다고 생각되는 모형에 대해서는 필요한 경우 새로운 모형을 개발하거나 수정하여 적용하였다. 왜냐하면 기존 Cellular Automata 모형 기반 차량행태모형은 거시적 분석개념에서는 어느 정도 타당하지만, 개별차량의 통행행태분석 측면에서는 문제점이 있기 때문이다. 또한 Toll구간 등 특수한 링크구간에 대해서는 새로운 모형을 적용하였다.

차량추종모형의 경우는 모든 링크구간에 대하여 II 장에서 언급하였던 차량추종모형을 토대로 하였으며, Step 3(감속)의 경우 3가지 규칙을 설정하여 사용자가 선택하도록 하였다. 첫 번째 규칙은 차량들의 감속이 gap과 무관하게 이루어진다는 가정이고, 두 번째 규칙은 현재 차량의 속도보다 gap이 작을 경우에만 차량이 감속을 한다는 가정이며, 3번째 규칙은 차량의 속도가 현재 1cell/s일 경우에는 gap과 관계없이 감속을 하지 않는다는 가정이다.

Cellular Automata를 이용한 차량추종모형은 전방차량의 속도와 관계없이 차량추종이 이루어지기 때문에 차량의 추종은 앞차량과의 gap과 차량의 감속확률에 의해서만 이루어진다. 기본 차량추종모형에 추가된 부분은 링크구간별 차량전이모듈을 설명하는 부분에서 자세하게 기술하였다. 아래는 본 모형에 사용된 차량추종모형의 수행단계를 보여준다.

- Step 1 : 전방차량과의 전방 gap 판단
- Step 2 : 전이가능 cell수 판단
  - $move = \min[v + 1, v_{max}, gap, v_{lanemax}]$
- Step 3 : 감속
  - $move = \max[move - 1, 0]$ 
    - : 제 1 규칙 감속조건
    - Random < Dec\_F1
  - 제 2 규칙 감속조건
    - : Random < Dec\_F2 and  $v < gap_{same}$

- 제 3 규칙 감속조건

: Random < Dec\_F3 and  $v > 1$

- Step 4 : 이동

-  $New\ cell = Current\ cell + move$

여기서,

$v$  : 차량속도(cell/s)

$v_{max}$  : 차량이 가질 수 있는 최대속도(cell/s)

$v_{lanemax}$  : 현재 주행차로의 제한속도(cell/s)

move : 다음시간에 이동가능한 거리(cell)

gap<sub>same</sub> : 전방차량과의 차두거리(cell)

Random : 무작위값

Dec\_F1 : 감속 제 1규칙의 감속비율

Dec\_F2 : 감속 제 2규칙의 감속비율

Dec\_F3 : 감속 제 3규칙의 감속비율

New\_cell : 다음시간 차량의 점유cell

Current\_cell : 현재시간 차량의 점유cell

본 모형에서는 기존 Cellular Automata모형을 기반으로 한 차로변경모형이 차로변경에 영향을 미치는 후방차량의 속도를 차로변경에 적용하지 않아서 발생하는 후방차량의 급작스런 감속을 방지하고 후방차량의 속도와 관계없이 언제나 최대안전속도(차로최고속도)를 확보해야 차로변경이 가능하기 때문에 발생하는 불균형한 차로이용을 방지하기 위하여 후방차량의 속도를 차로변경모형에 적용하였다.

본 모형에서 적용한 차로변경모형은 크게 4가지로 구분하여 적용하였는데, 첫 번째는 현재 운행중인 차로에서 선호속도를 얻을 수 없는 경우의 선호조건 차로변경모형, 두 번째는 합류 및 분류를 위한 강제조건 차로변경모형, 세 번째는 차로축소 또는 합류로 인해 영향을 받는 인접차로를 주행중인 차량에게 적용되는 준선호조건 차로변경모형, 마지막으로 네 번째는 Toll 진입구간에 적용되는 밀도조건 차로변경모형이다.

##### (1) 선호조건 차로변경모형

현재 주행차로에서 차량이 원하는 속도를 얻을 수 없는 경우

- Step 1 : 차량선호조건 판단

-  $v + 1 > gap_{same}$  and  $gap_{for\ ward} > gap_{same}$

- Step 2 : 차량안전조건 판단
  - $gap_{forward} > v$
  - $gap_{back} \geq \min(back_{speed} + 1, v_{lanmax})$
- Step 3 : 확률조건 판단
  - $Random < Lane\_PR$

여기서,

- $v$  : 차량속도(cell/s)
- $v_{lanmax}$  : 차로변경 대상차로의 제한속도(cell/s)
- $gap_{same}$  : 주행차로 전방 차두거리(cell)
- $gap_{forward}$  : 차로변경 대상차로 전방 차두거리(cell)
- $gap_{back}$  : 차로변경 대상차로 후방 차두거리(cell)
- $back_{speed}$  : 후방차량의 속도(cell/s)
- $Lane\_PR$  : 선호조건 차로변경 확률
- $Random$  : 무작위값

(2) 준선호조건 차로변경모형

합류 및 차로감소로 인해 간접적으로 영향을 받는 차량에 적용(차량이 합류 및 차로감소 인접차로에 진입했을 경우에만 적용됨)

- Step 1 : 준선호조건 판단
  - $gap_{forward} > gap_{same}$
- Step 2 : 차량안전조건 판단
  - $gap_{forward} > v$
  - $gap_{back} \geq \min(back_{speed} + 1, v_{lanmax})$
- Step 3 : 확률조건 판단
  - $Random < Agr\_PR$

여기서,

- $Agr\_PR$  : 준선호조건 차로변경 확률

(3) 강제조건 차로변경 모형

- Step 1 : 1차 강제조건 판단
  - 1차 강제적 조건은 최소안전조건을 판단하여 차로변경 여부를 결정
  - $gap_{forward} \geq v$
  - $gap_{back} \geq back_{speed}$
  - $Random < Comp\_PR1$
- Step 2 : 2차 강제조건 판단
  - 1차 강제적 조건을 만족하지 못한 경우에 해당

여기서,

- $Need_{forward}$  :  $v - gap_{forward}$
- $Need_{back}$  :  $back_{speed} - gap_{back}$
- $Comp\_PR1$  : 1차 강제적 조건 차로변경 확률
- $Comp\_PR2$  : 2차 강제적 조건 차로변경 확률
- $Comp\_VA$  :  $Lim\_VA - \frac{Lim\_VA \times Dis\_off}{Random \times Dis\_pf}$
- $Comp\_VA$  : 거리에 따른 강제적 가중치값
- $Lim\_VA$  : 최대감속허용 한계값
- $Dis\_pf$  : 분류를 위한 강제조건 차로변경 모형 적용 거리값
- $Dis\_off$  : 분류지점까지의 거리

(4) 밀도조건 차로변경모형

밀도조건 차로변경모형은 Toll구간에서 적용

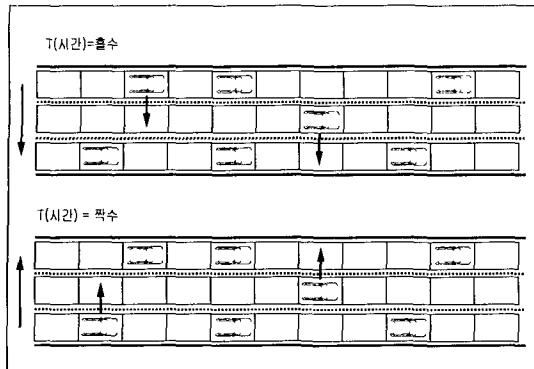
- Step 1 : 밀도조건 판단
  - $In\_Den > Obj\_Den$
- Step 2 : 최소안전조건 판단
  - $Back_{speed} \geq gap_{back}$
- Step 3 : 확률조건 판단
  - $Random < Den\_PR$

여기서,

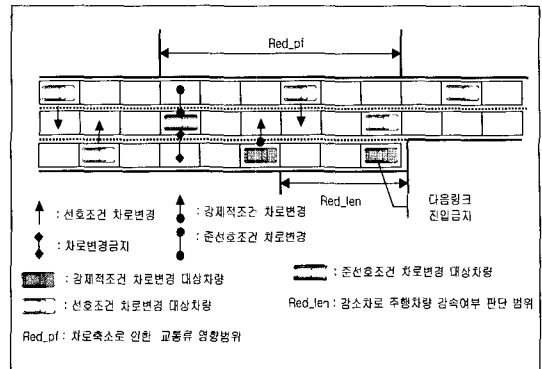
- $In\_Den$  : 주행차로의 밀도
- $Obj\_Den$  : 차로변경 대상차로의 밀도
- $Den\_PR$  : 밀도조건 차로변경 확률

본 모형에는 차로변경모형 적용을 위한 기본전제가 있는데, 그것은 차량이 차로변경을 수행하는 순간에는 다른차량의 차로변경여부를 모르기 때문에 두 대의 차량이 동시에 한 셀로 점유할 수 있다는 것이다. 그래서 본 모형에서는 이러한 문제점을 없애기 위하여 시뮬레이션 시간에 따라 안쪽차로→바깥쪽차로, 바깥쪽차로→안쪽차로로 차로변경을 수행하였다. 여기서 같은 cell에 진입한다는 의미는 예를 들어, 3차로 이상인 링크에서 1차로→2차로로 차로변경을 하는 차량과 3차로→2차로로 차로변경을 하는 차량이 동시에 차로변경 조건을 만족할 경우에 두차량이 하나의 cell에 점유된다는 의미이다.

<그림 4>는 시간에 따른 차로변경모형 적용을 보여주는 예이다.



〈그림 4〉 시간에 따른 차로변경모형 적용



〈그림 5〉 차로감소 링크구간 차량행태모형 적용 예

2) 링크구간별 세부적용내용

(1) 차로감소링크

차로감소가 이루어지는 링크에서는 차로감소로 인해 통행에 영향을 미치는 거리범위(Red\_PF)값을 입력값(Default=500m)으로 받아, 차량이 입력된 거리범위안에 있는것으로 판단되면 각 차로의 특성별로 차로변경모형을 적용하였고, 축소차로를 이용하는 차량이 축소지점 근처까지 차로변경을 하지 못한 차량에 대해서는 감속을 유도하였다.

다음은 차로감소링크에서의 차량행태모형 적용과정을 보여준다.

- Step 1 : 합류로 인한 영향판단
  - Step 1-1 : 주행차로 특성판단 (감소차로, 감소인접차로, 일반주행차로)
  - Step 1-2 : 감소차로 영향권 범위 판단
  - Step 1-3 : 차로감소 위치판단 (좌측, 우측, 양측모두)
  - Step 1-4 : 감소차로 주행차량의 감속여부 판단
- Step 2 : 차로변경 및 차량전이
  - 감속차로 주행차량
    - 강제조건 차로변경 모형 적용
    - 감속여부에 따라 감속
    - 2차 강제적 조건 차로변경 판단을 위한 함수

$$Comp\_VA = Lim\_VA - \frac{Lim\_VA \times Red\_off}{Random \times Red\_pf}$$

여기서,

Red\_pf : 차로감소로 인한 영향권 거리

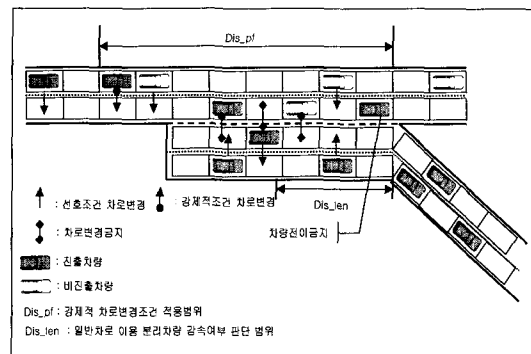
Red\_off : 차로감소지점까지의 거리

(2) 분류링크

연속류에서 분류링크는 일반적으로 감속차로가 설치되어 있는 구간을 의미하지만, 본 연구에서는 감속차로 없이 분류되는 특수한 가로망에 대해서도 분석이 가능하도록 모형화 하였다.

다음은 분류링크에서의 차량행태모형 적용과정을 보여준다.

- Step 1 : 분류로 인한 영향 판단
  - Step 1-1 : 분류지점까지의 거리판단
  - Step 1-2 : 분류지점 접속위치판단(좌측,우측)
- Step 2 : 차로변경 및 차량전이
  - 분리되는 차량



〈그림 6〉 분류링크구간 차량행태모형 적용 예



- 분류위치에 따라 접속차로로 강제적조건 차로 변경모형 적용
- 분류위치 반대편차로로의 차로변경 금지
- 분류위치까지 접속차로로 진입하지 못한 차량은 감속조건 적용 및 차량전이 금지
- 2차 강제적 조건 차로변경 판단을 위한 함수

$$Comp\_VA = Lim\_VA - \frac{Lim\_VA \times Dis\_off}{Random \times Dis\_pf}$$

여기서,

Dis\_pf : 분류를 위한 강제적조건 차로변경모형 적용 거리값

Dis\_off : 분류지점까지의 거리

- 분리되지 않는 차량
  - 선호조건 차로변경모형 적용
  - 접속차로로의 차로변경 금지

### (3) 합류링크

연속류에서의 합류링크는 가속차로가 설치된 링크 구간으로 말하는 것으로, 합류링크구간에서의 차량행태모형 적용은 가속차로에 있는 차량과 일반차로에 있는 차량, 그리고 가속차로의 인접차로에 있는 차량을 구분하여 수행하였다.

다음은 합류링크에서의 차량행태모형 적용과정을 보여준다.

- Step 1 : 차로감소로 인한 영향 판단
  - Step 1-1 : 주행차로 특성판단 (가속차로, 합류인접차로, 일반주행차로)
  - Step 1-2 : 가속차로 길이판단
  - Step 1-3 : 접속위치판단(좌측,우측,양측모두)
- Step 2 : 차로변경 및 차량전이
  - 가속차로 주행차량
    - 강제적조건 차로변경 모형 적용
    - 가속차로 마지막지점까지의 거리에 따라 감속 및 차량전이 금지
  - 2차 강제적 조건 차로변경 판단을 위한 함수

$$Comp\_VA = Lim\_VA - \frac{Lim\_VA \times Add\_off}{Random \times Add\_pf}$$

여기서,

Add\_pf : 가속차로 길이

Add\_off : 가속차로 마지막 지점까지의 거리

- 인접차로 주행차량
  - 준선호조건에 의한 차로변경모형 적용
  - 가속차로로의 차로변경 금지
- 일반차로 주행차량
  - 선호조건에 의한 차로변경모형 적용

### (4) Toll 구간링크

Toll 구간에서는 밀도조건 차로변경모형과 차량들이 Toll 구간진입 전에 자연스러운 감속이 이루어지도록 차량추종모형을 적용하였다. 그리고 Toll Booth에 진입하는 차량에 대해서는 Shift N.E.D분포를 이용하여 서비스 시간을 산출하였다.

Toll Booth 평균 서비스 시간은 차량당 발생되어 지며 산출에 사용된 함수식은 다음과 같다.

$$Wait\_time = - \frac{\ln(U) - (1/Mean) \times Min}{1/Mean}$$

여기서,

Wait\_time : Toll Booth 서비스시간

Mean : 평균 서비스시간

Min : 최소 서비스시간

U : {0,1}사이의 무작위값

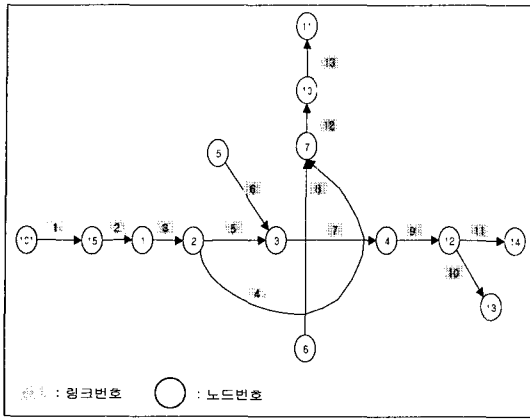
다음은 Toll구간 링크에서의 차량행태모형 적용과정을 보여준다.

- Step 1 : Toll Booth 진입여부 판단
  - Step 1-1 : Toll Booth 서비스 여부 판단
- Step 2 : 차로변경 및 차량전이
  - Toll Booth 진입전 차량
    - 밀도조건에 의한 차로변경모형 적용
  - Toll Booth 진입차량
    - 서비스시간 산출

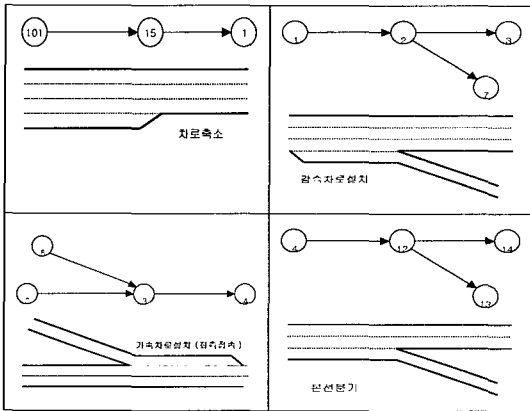
## IV. 모의 실험

### 1. 모의실험 네트워크 및 O/D 자료

모의실험 대상 네트워크는 13개 노드와 13개 링크로



〈그림 7〉 모의실험 네트워크 구조



〈그림 8〉 모의실험 네트워크 링크별 세부기하구조

연결된 연속류 가로망으로, 두 개의 진입 Ramp, 한 개의 진출 Ramp, 그리고 본선분리구간이 포함된 네트워크 구조이며, 기본차로수는 편도 3차로로 설정하였으며, 감·가속차로가 접속되는 링크는 편도 4차로, 그리고 진입 Ramp와 진출 Ramp는 1차로로 각각 설정하였다.

차로의 최대속도는 본선차로의 경우 100km/h(4cell/s), 감·가속차로는 75km/h(3cell/s)로 하였다.

모의실험을 위한 O/D는 모형이 합류 및 분류 그리고 차로축소로 인한 교통류영향을 정확히 분석할 수 있도록 하기 위하여 기본적으로 용량에 가깝게 배정하였으며, 세부내용은 〈표 3〉와 같다.

**2. 모의실험 분석결과**

아래의 분석결과는 1시간을 시뮬레이션 한 결과이며, 30초 단위의 출력자료를 이용한 것이다.

〈표 3〉 모의실험 O/D입력자료

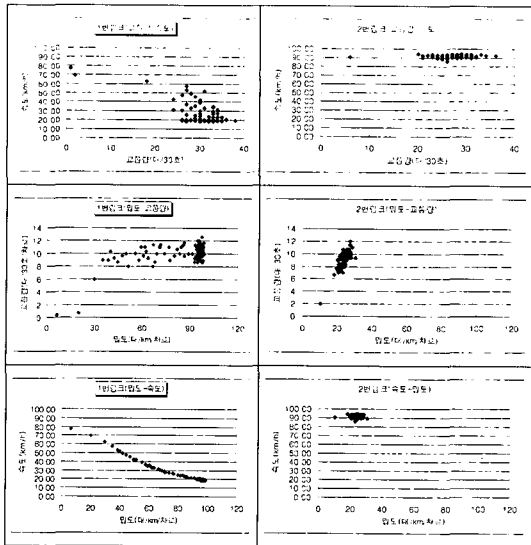
구분	출발지 노드	목적지 노드	교통량(대)	중차량 비율(%)
1	101	14	5000	5
2	101	13	1500	5
3	101	11	1500	5
4	5	13	2000	5
5	5	14	500	5
6	6	11	6000	5

〈표 4〉 모의실험 결과

구분	교통량 (대/30초)	속도 (km/h)	밀도 (대/km/차로)	링크특성
Link1	30	25	86	차로축소
Link2	27	90	24	
Link3	24	75	19	분류
Link4	2	83	6	
Link5	22	79	22	
Link6	15	61	58	
Link7	32	40	53	합류
Link8	26	88	23	
Link9	28	78	29	분류
Link10	13	74	41	
Link11	14	85	20	
Link12	24	74	20	합류
Link13	24	94	20	

〈표 4〉는 모의실험 결과를 요약한 것이다.

모의실험 결과(차량의 속도가 100km/h로 제한), 자유류 속도는 94km/h로, 최대지체링크의 평균통행 속도는 25km/h로 나타났으며, 모의실험 네트워크를 동서가로망과 남북가로망으로 구분하여 볼 때, 평균 통행속도는 각각 65km, 83km/h로 나타났다. 교통류에 대한 영향은 차로축소가 합류보다 더 큰 것으로 나타났으며, 이는 실제 교통현상과 유사한 결과이다. 차로축소 및 합류로 인해 유발되는 통행속도감소는 자유류속도를 가지고 판단할 때 차로축소(링크1, 105→1→2)는 약 73%, 합류(링크7, 2→3→4)는 34%인 것으로 나타났다. 그리고 실제 교통현장에서 차로축소후, 또는 합류후에는 차량들이 용량상태에서 빠져나와 가속하기 때문에 자유류상태를 나타내는데 이번 모의실험결과에서도 이와 유사한 현상을 보였다.



〈그림 9〉 1번링크, 2번링크의 교통량-속도, 밀도-교통량, 밀도-속도관계 그래프(차로축소)

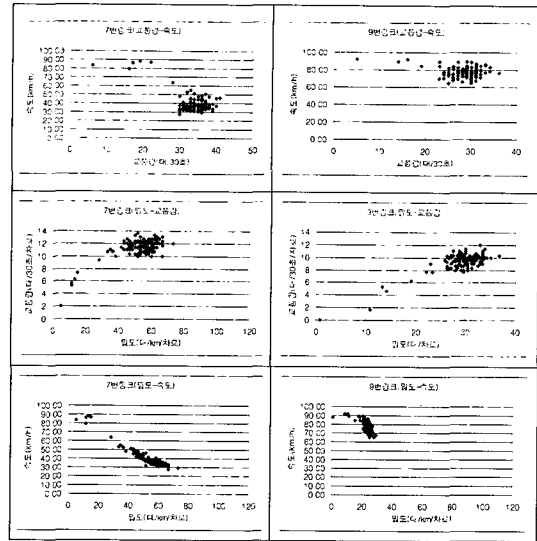
분류로(링크 9, 4→12→14, 4→12→13) 인해 유발되는 통행속도감소는 차로축소나 합류지점에서와 같이 급격한 통행속도감소를 유발하지는 않았으나, 자유류 속도와 비교할 때 17%정도 통행속도를 저하시키는 것으로 분석되었다.

〈그림 9〉, 〈그림 10〉은 차로축소, 합류링크와 영향을 미치는 링크간의 교통량-속도, 밀도-교통량, 밀도-속도관계 그래프이다.

**V. 결론 및 향후연구과제**

본 연구는 Cellular Automata에 기반을 둔 차량행태모형을 가지고 기종점기반 대규모 네트워크 미시적 교통류 시뮬레이션 모형을 개발하는 첫 번째 단계로 연속류구간의 통행행태 분석이 가능한 시뮬레이션 모형을 개발하였다. 그리고 교통공학적 측면에서 문제가 있다고 판단되는 차량행태모형에 대해서는 교통류이론과 시뮬레이션 결과를 통해 산출된 새로운 모형을 적용하였다. 또한 모의실험을 통하여 개발한 시뮬레이션 모형의 적용타당성을 검증하였다.

본 연구에서 개발한 시뮬레이션 모형을 통해 기존 거시적 교통류 시뮬레이션 모형에서 설명할 수 없었던 여러 교통현상(합류, 차로축소, 분류등으로 유발되는 교통현상)을 설명하는 것은 모의실험 결과를 통해 볼 때 별다른 어려움이 없는 것으로 검증되었다. 또한



〈그림 10〉 7번링크, 9번링크의 교통량-속도, 밀도-교통량, 밀도-속도관계 그래프(합류)

우리나라의 가로망구조에 기반을 두고 개발되었기 때문에 기존에 외국에서 개발된 미시적 시뮬레이션 모형이 표현하지 못했던 가로망을 본 모형을 통해서 가능한 것으로 나타났다. 향후에는 좀 더 현실적인 교통류 시뮬레이션을 위하여 Parameter Calibration이 수행되어야 할 것으로 판단되며, 2단계로 단속류구간에 대한 시뮬레이션 모형도 개발할 예정이다.

현재까지 본 논문에서 제시한 모형으로 분석 가능한 가로망의 규모는 링크(평균 링크길이 2km, 편도 6차로 기준) 1000개 정도의 중규모 가로망 정도가 분석 가능하며, 현재 모형에서 사용되고 있는 컴퓨터 Language의 한계로 인해 앞에서 제시한 정도의 가로망 분석만이 가능하나 향후 메모리를 효율적으로 관리할 수 있는 컴퓨터 Language로 변환한다면, 편도 4차로 도로를 기준으로 하였을 경우 도로 연장이 2500km 정도의 가로망도 분석가능할 것으로 예측된다. 또한, 현재 개발되어 있는 모형에서 차량이 갖고 있는 정보 중 일부 불필요한 정보를 삭제한다면 분석구간의 길이는 더욱 늘어 날것으로 기대된다. 향후에는 대규모 네트워크에 적용하기에 앞서 좀 더 세부적인 메모리의 관리에 대한 연구도 진행할 예정이다.

**참고문헌**

1. 건설부, "도로용량편람", 대한교통학회, 1992.

2. Stephen Wolfram, "Cellular Automata and Complexity", Addison-Wesley Publishing Company, 1994.
  3. A. Schadschneider and M. Schreckenberg, "Cellular automaton models and traffic flow", Institut für Theoretische Physik Universität zu Köln, 1993.
  4. A. Schadschneider and M. Schreckenberg, "Cellular automata for traffic flow analytical results", Institut für Theoretische Physik Universität zu Köln, 1995.
  5. M. Schreckenberg, "Physical Modeling of Traffic with Stochastic Cellular Automata", Universität Duisburg, 1995.
  6. Kai Nagel, christopher L. Barrett, and Marcus Rickert, "Parallel traffic micro-simulation by cellular automata and application for large scale transportation modeling", Los Alamos National Laboratory, 1996.
  7. Márton Sasvári and Janos Kertész, "On Cellular Automata Models of Single Lane traffic", Institute of Physics, Eötvös University, 1997.
  8. M. Rickert, K. Nagel, M. Schreckenberg, A. Latour, "Two Lane Simulations using Cellular Automata", Center for Parallel Computing, Universität zu Köln, 1995.
  9. Simon C. Benjamin and Neil F. Johnson "Cellular automata models of traffic flow along a highway containing a junction", physics Department, Clarendon Laboratory, Oxford University, 1996.
- ♣ 주 작 성 자 : 조중래  
 ♣ 논문투고일 : 2001. 5. 25  
 논문심사일 : 2001. 6. 7 (1차)  
                   2001. 6. 12 (2차)  
 심사판정일 : 2001. 6. 12