

■ 論 文 ■

CA모형을 이용한 단기 구간통행시간 예측에 관한 연구

A Study on Link Travel Time Prediction by Short Term Simulation Based on CA

이 승 재

(서울시립대학교 교통공학과 부교수)

장 현 호

(한국도로공사 도로교통기술원 연구원)

목 차

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> I. 서론 II. CA기반 차량모형의 이론적 고찰 <ul style="list-style-type: none"> 1. 모형의 개념 및 변수정의 2. 차량추종모형의 고찰 3. 링크전이모형의 고찰 III. 기존 CA모형의 구현 및 모형구축 <ul style="list-style-type: none"> 1. 기존 모형의 구현 및 한계 2. 차량추종모형의 구축 및 구현 3. 링크전이모형의 구축 및 구현 IV. 통행시간 예측 차량 모의실험기 개발 | <ul style="list-style-type: none"> 1. 통행시간예측 모의실험 과정 2. 차로 및 차량표현 3. 노드-링크 체계 4. 초기대기차량의 형성 5. 차량발생 및 차량부하 V. 구축모형의 적용 <ul style="list-style-type: none"> 1. 네트워크 및 평가기준 설정 2. 결과분석 VI. 결론 및 향후 연구과제 참고문헌 |
|---|--|

Key Words : Cellular Automata모형, "Slow-to-stop"규칙, 차량묶음, 패턴자료, 단기구간통행시간예측

요 약

본 연구는 ①Cellular Automata(이하 CA)모형을 기반으로 대규모 네트워크에 적용 가능한 보다 현실적인 CA차량모형 구축, ②구축된 CA차량모형을 이용한 차량 모의실험기의 개발과 개발된 차량 모의실험기를 이용한 단기링크통행시간 예측으로 구성된다.

구축된 CA차량추종모형은 기존의 CA차량추종모형 보다 현실적으로 감속을 통한 정지과정을 설명하면서 거시적 지표인 교통량-밀도-속도관계를 설명하였다. 또한 링크의 유출교통량(Outflow)을 제어하기 위한 차량의 링크전이모형은 기존의 차량 링크전이모형에 비하여 보다 안정된 대기차량을 형성하였다.

단기링크통행시간 예측을 위한 차량모의실험기는 대규모 가로망에 적용이 가능하도록 차량묶음(Packet, 이하 차량묶음)방식과 링크기반 모의실험방식으로 컴퓨터의 연산 수행속도 및 메모리를 효율적으로 처리할 수 있었으며, 기존의 시계열자료 예측기법에서 고려할 수 없었던 차량의 행태 및 링크 상에서 발생하는 이동류 과포화, 뒷막힘현상 등의 메커니즘을 고려함으로써 기존 시계열자료 예측기법에 비하여 우수한 예측력을 보였다.

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2002-000-00328-0)지원으로 수행되었음.

1. 서론

실시간 최적경로의 탐색에 주요한 역할을 하는 단기링크통행시간의 예측에는 일반적으로 인공신경망, Kalman Filtering, ARIMA 등의 시계열자료 예측 기법이 이용되고 있으나, 이러한 예측기법들은 단지 시간에 따른 링크통행시간의 변화추이를 고려하여 다음 시간대의 링크통행시간을 예측하기 때문에 링크에서 발생하는 운전자의 행태, 이동류 과포화, 뒷막힘현상 등의 메커니즘을 고려할 수 없는 한계를 안고 있다. 이러한 기존 시계열자료 예측기법의 한계를 극복하기 위한 노력으로 본 연구에서는 CA모형을 이용한 차량 시뮬레이션 기법을 이용하여 단기링크통행시간을 예측하고자 한다.

본 연구는 두 부분으로 구성된다. 전반부는 단기링크통행시간 예측 시뮬레이션에 이용하기 위한 CA차량추종모형의 구축 및 링크단에서 차량의 유출교통량을 제약하기 위한 차량의 링크전이모형 구축으로 구성되며, 후반부는 전반부에서 구축된 CA모형을 이용하여 개발된 차량 모의실험기를 이용하여 단기링크통행시간을 예측하는 방법론으로 구성된다.

전반부는 CA차량추종모형과 링크전이모형의 구축으로 구성된다. CA모형이 국내에 소개된 이후로 국내에서도 분석도구의 개발에 관한 연구가 지속적으로 보고되고 있으나, CA차량추종모형의 연구에 대해서는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 CA차량추종모형중의 하나인 NaSch모형(Nagel, Schreckenburg, 1992)을 기반으로 보다 현실적인 차량추종모형을 구축하였다. 그리고 링크의 통행시간에 큰 영향을 미치는 링크단에서 차량의 유출을 제약하기 위하여 기존의 차량링크전이모형을 보완하여 구축하였다.

후반부는 본 연구가 단기링크통행시간의 예측을 위한 방법론을 소개하는 만큼 짧은 시간내에 예측과정이 수행되어야함을 고려하여 단기링크교통량의 예측에 시계열 예측기법 중 가장 빠른 연산속도와 우수한 예측력을 가진 Kalman Filtering을 이용하였으며, 구축된 CA차량추종모형의 적용에는 차량묶음방식(Packet Method)과 링크 기반 차량 모의실험방식을 이용하여 컴퓨터의 연산속도 및 메모리 문제를 해결할 수 있도록 하였다.

본 연구에서 제안한 CA 시뮬레이션기법을 이용하여 단기링크통행시간을 예측한 결과 기존의 시계열자료

예측모형이 안고 있는 Time Lag문제를 극복하고 추세를 왜곡하기 않으면서 우수한 예측력을 보였다.

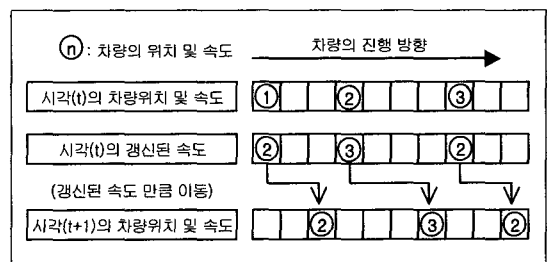
II. CA기반 차량모형의 이론적 고찰

1. 모형의 개념 및 변수 정의

CA차량추종모형은 통계물리학을 근간으로 차량의 미시적 관계를 간략한 차량추종규칙을 이용하여 표현하면서 교통류의 거시적 행태인 교통량-속도-밀도 관계를 해석하는 이산적 시-공간모형으로 컴퓨터의 연산구조를 고려하여 빠른 시간내에 개별차량기반으로 대규모 가로망을 모의실험하고자 하는 모형이다.

현실세계에서 차량의 이동은 시-공간적으로 연속적이다. 그러나 연속적 시-공간의 연산에는 실수형 자료가 요구되어 연산수행속도 및 메모리의 문제가 발생하게 된다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 CA차량추종모형은 연속적인 공간을 일정 길이의 단위격자(이하 Cell, 셀)로 나누어 공간을 이산적으로 구성한다. 차량은 Cell 점유의 유-무에 따라 이진구조{1,0}을 이용하여 표현하게 되며, 차량의 속도(Cell/초)는 Cell 단위의 정수배로 표현된다.

〈그림 1〉은 CA차량추종모형의 차량표현 및 이동방식을 보여주고 있으며, 원안의 숫자는 차량의 속성값인 속도이다. Cell의 정수 배로 표현되는 속도는 시각(t)의 선행차량과 후행차량간의 비점유된 Cell의 개수와 시각(t)의 속도를 이용하여 다음 시각(t+1)의 속도를 갱신한다. 그리고 차량의 주행 중에 발생하는 가속소음(Acceleration Noise)은 무작위 확률값을 이용하여 일개의 Cell 만큼 속도를 감소시키면서 차량의 속도를 설명한다. 본 연구에서 이용되는 변수는 〈표 1〉과 같이 정의한다.



〈그림 1〉 CA차량모형의 차량표현 및 이동방식

〈표 1〉 변수 및 변수 정의

변수	변수정의(단위)
v_t	시각(t)에서 차량속도(Cell/초)
v_{t+1}	시각(t+1)에서 갱신된 차량속도(Cell/초)
v_{max}	차량의 최대속도(Cell/초)
ac	차량의 단위 가-감속도(1Cell/초)
g_n	추종차량간의 비점유된 셀 개수(Cell)
s_n	정지선과 선두차량간의 비점유된 셀 개수(Cell)
p_{noise}	차량의 불규칙적인 속도감속 확률값(0~1)
p_{random}	무작위 확률값(0~1)
p_{trans}	차량의 링크전이 확률(0~1)
x_n	시각(t)의 차량의 위치
x_{n+1}	시각(t+1)의 차량의 위치
sd_n	속도(v)에서 차량(n)의 총 정지거리(Cell)
n_n	sd_n 영역에 존재하는 차량의 대수(Cell)
mx_n	속도(v)인 차량의 감속영향권(Cell) (= $sd_n + n_n + a$)

2. 차량추종모형의 고찰

K Nagel과 M Schreckenberg에 의해 제안된NaSch 모형(1992)은 ①가속, ②감속, ③무작위 확률에 의한 불규칙적인 감속, ④이동의 4단계 이동규칙(Movemetnet rules)으로 구성되며 다음과 같다.

[단계 1] 가속규칙

$$v_{t+1} = \min\{v_t + ac, v_{max}\} \quad \text{if } (v_t < g_n)$$

차량의 v_t 가 g_n 보다 작으면 차량은 최대속도까지 가속한다.

[단계 2] 감속규칙

$$v_{t+1} = \min\{v_t, g_n\} \quad \text{if } (v_t \geq g_n)$$

$v_t \geq g_n$ 이면 $v_t = g_n$ 의 속도로 감속한다.

[단계 3] 불규칙적인 감속(with p_{noise})

$$v_{t+1} = \max\{v_{t+1} - ac, 0\} \quad \text{if } (p_{noise} \geq p_{random})$$

$p_{noise} > p_{random}$ 이면 차량은 속도를 ac (보통 1cell/초)만큼 감소시킨다.

[단계 4] 이동규칙

$$x_{n+1} = x_n + v_{t+1}$$

차량은 위의 3단계 과정을 거쳐 갱신된 속도(v_{t+1})만큼 전방으로 이동한다.

3. 링크전이모형의 고찰

본 연구에서는 차량의 링크유출을 제어하기 위한 차량의 링크전이모형으로 P M Simon과 K Nagel (1998)에 의해 제안된 Random Traffic Light(이하 확률신호)와 Normal Traffic Light(이하 일반신호)에 대하여 고찰하도록 한다. 확률신호는 전이확률(p_{trans})을 이용하여 유출교통량을 확률적으로 제어하는 방식이며, 일반신호는 일반적인 신호교차로와 같이 차량은 적색시간동안 대기하였다가 녹색시간에 방출된다.

1) 확률신호

확률신호는 차량의 링크전이확률(p_{trans})을 이용하여 간략하게 링크의 유출교통량을 제어하며, p_{trans} 가 증가하면 차량이 링크를 탈출할 기회는 확률적으로 증가한다. p_{trans} 를 유효녹색시간(g_e)과 주기길이(C)로 표현하면 다음과 같다.

$$p_{trans} = g_e / C$$

p_{trans} 는 정지선 후방 첫 번째 차량에 대하여 CA 차량추종모형의 g_n 의 계산시 적용되며, 녹색과 적색 신호는 p_{trans} 와 p_{random} 을 이용하여 다음과 같이 g_n 을 제약하여 표현한다.

$$\text{if } (p_{trans} > p_{random}) \text{이면, } g_n = g_n$$

: g_n 을 제약하지 않아 차량은 링크를 탈출한다.

$$\text{if } (p_{trans} \leq p_{random}) \text{이면, } g_n = s_n$$

: g_n 은 정지선까지의 거리(cell)인 s_n 으로 제약되어 차량은 링크를 탈출하지 못하고 정지선에 정지한다.

2) 일반신호

Schadschneider 등(1999)은 NaSch 차량추종모형과 BML(Biham-Middleton-Levine)모형을 이용하여 일반신호모형을 제시하였다. 이 모형은 기존의 NaSch모형과 같은 4단계 이동규칙을 가지면서 2단계의 감속규칙을 다음과 같이 모형화하였으며, 정지선 후방 첫 번째 차량에 적용하게 된다.

[단계 2] 선행차량 또는 신호현시에 의한 감속

적색 및 황색 현시 : 정지선까지 거리를 고려한 차량감속

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

녹색 현시 : g_n 을 고려한 차량의 감속

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

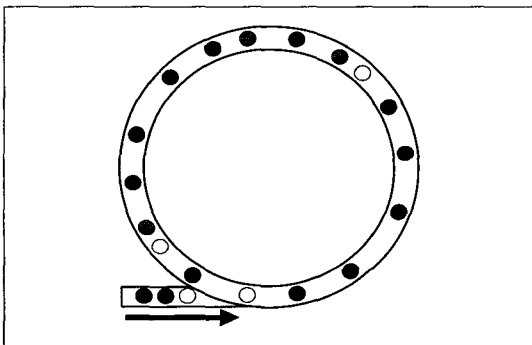
III. 기존 CA모형의 구현 및 모형 구축

1. 기존 모형의 구현 및 한계

1) 모의실험 준비작업

기존 CA모형의 구현 및 모형의 구축을 위한 모의 실험을 위하여 <그림 2>와 같이 차량의 진입은 허용되고 진출은 허용되지 않는 원형링크를 구축하였다.

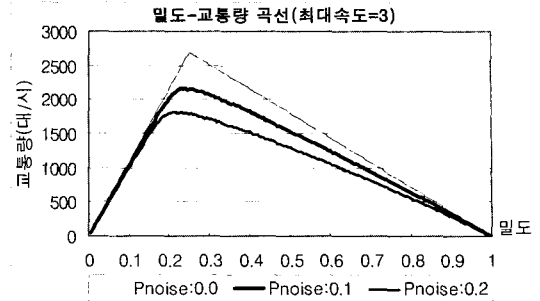
시스템의 크기는 링크길이 1,200m이며, Cell의 길이는 혼잡밀도에서 차량의 길이와 차간거리를 합하여 6m로 가정하였다. 따라서 모의실험 원형링크는 200개의 Cell로 구성된다. 이상의 가정은 혼잡밀도는 167대/km로 해당하고, 최대속도가 3Cell/초일 경우 실제속도는 64.8kph에 해당된다.



<그림 2> 원형 링크

2) NaSch모형의 구현결과

<그림 3>은 NaSch모형의 구현결과를 $v_{max} = 3$ 의 조건에서 p_{noise} 의 증가에 따라 거시적 교통량-밀도 관계로 보여주고 있다. p_{noise} 가 0에서 0.1, 0.2로 증가하면



<그림 3> 거시적 교통량-밀도 관계

용량은 약 2,700대/시에서 약 2,200대/시, 1,800대/시로 감소하면서 거시적 교통량-밀도 관계를 설명하고 있다.

그리고 p_{noise} 는 용량을 제약함과 동시에 차량의 자유속도를 설명하게 된다. 임계밀도보다 작은 밀도 ($g_n \gg v_{max} + 1$)에서 v_{max} 로 주행하는 차량 중 p_{noise} 만큼의 차량은 $v_{max} - 1$ 로 감속하게 됨으로 실제 차량의 자유속도는 다음과 같이 계산된다.

$$((1 - p_{noise}) \times v_{max} + p_{noise} \times (v_{max} - 1)) \times \text{셀길이}$$

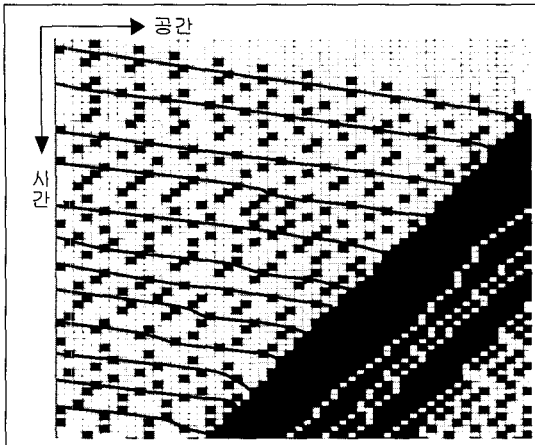
따라서 $v_{max} = 3$, $p_{noise} = 0.2$ 에서 실제 자유속도는 $((1 - 0.2) \times 3 + 0.2 \times (3 - 1)) \times 6 = 16.8\text{m/초}$ 이며 이것은 60.48kph에 해당한다.

3) NaSch모형의 한계

NaSch모형은 선행차량이 정지한 상태이고 최대속도로 주행하는 추종차량의 조건이 $v_t \geq g_n$ 일 경우 감속규칙에 의해 차량의 속도는 g_n 과 같게되어 선행차량과 충돌을 방지하게 된다. 따라서 차량은 최대속도로 주행하면서 대기의 후미에 도착함과 동시에 갑자기 정지하게 되는 모형상의 한계를 가지고 있다. <그림 4>는 대기행렬의 후미에 도착하는 차량의 궤적을 시공도로 보여주고 있으며, 대기의 후미에 도착하는 차량은 최대속도로 주행하면서 감속과정을 경험하지 않고 도착하고 있다.

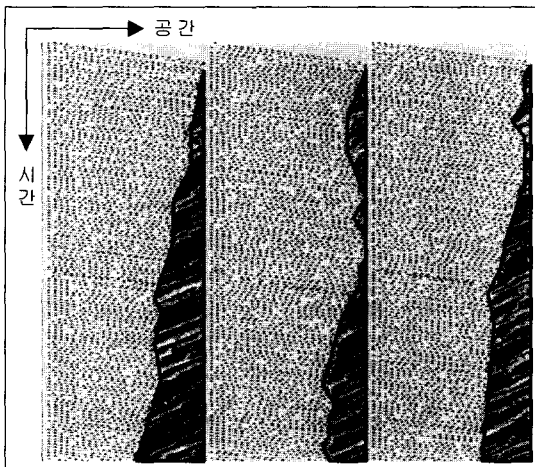
4) 링크전이모형의 구현결과 및 한계

Schadschneider 등(1999)의 일반신호모형은 NaSch모형의 감속규칙을 따르고 있어 <그림 4>와 동일하게 차량의 정지과정에서의 비현실적인 한계를 가지고 있다.



(참고 : 위의 시공도에서 실선은 대기의 후미에 도착하는 차량의 궤적을 나타낸 것임.)

〈그림 4〉 NaSch모형의 차량도착 형태



$p_{trans}=0.33, p_{trans}=0.35, p_{trans}=0.37$

〈그림 5〉 확률신호의 대기형성 시공도

〈그림 5〉는 $v_{max}=3$ 셀/초, $p_{noise}=0.2$, 교통량=960대/시 조건에서 확률신호의 구현 결과를 시공도로 보여 주고 있으며, $p_{trans}=0.35$ 의 형성된 대기행렬의 길이가 $p_{trans}=0.37$ 의 경우보다 짧게 나타나고 있어, 전이 확률(p_{trans})의 감소에 따라 대기성장의 안정성을 설명할 수 없다.

2. 차량추종모형의 구축 및 구현

1) 차량추종모형의 구축

본 연구에서는 〈그림 4〉에서 보여주는 차량의 궤

적에서 알 수 있듯이 NaSch모형의 비 현실적인 급정지의 문제를 보완하기 위하여 대기행렬의 후미에 도착하는 차량의 감속규칙에 “Slow-to-stop”규칙을 추가하였다. 이 규칙은 물리적으로 가속도와 감속도가 같다고 가정한다.

구축된 “Slow-to-stop” 규칙은 주행중인 차량의 감속영향권(mx_n) 내에 정지차량이 존재할 경우 강압적으로 감속단위(ac , 보통 1셀/초)만큼 감속하게 된다. mx_n 는 정지거리(sd_n)와 정지거리 내에 존재하는 차량의 대수(n_n)로 다음과 같이 정의된다.

$$mx_n = sd_n + n_n + \alpha$$

여기서,

α : 감속영향권 조정상수(cell)

CA차량추종모형은 차량의 가-감속도를 셀/단위시간의 정수형자료를 이용하여 표현하게 된다. 따라서 정확한 가속도 및 감속도를 표현할 수 없는 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 가속도와 감속도가 1cell/초로 같다고 가정한다. 따라서 속도(v_n)인 차량의 총 정지거리(sd_n)은 정지상태에서 임의의 속도까지 가속단위 ac (셀/초)로 등가속하면서 주행한 거리와 같으므로 다음과 같이 계산된다.

$$sd_n = \sum_{i=1}^{v_n} i$$

차량의 정지를 위한 감속상황의 판단에는 전방의 정지차량과 주행중인 차량과의 비점유된 셀의 개수(g_{uo})와 감속영향권(mx_n)을 이용하여 감속상황을 판단하게 되며, “Slow-to-stop”규칙은 NaSch모형의 감속규칙에 다음과 같이 적용된다.

[단계 2] 감속규칙

if($g_{uo} > mx_n$)이면 $v_{t+1} = \min\{v_t, g_n\}$

: 전방의 정지차량과 당 차량과의 비점유된 셀의 개수가 감속영향권보다 크면 NaSch모형의 감속규칙을 따른다.

if($g_{uo} \leq mx_n$)이면 $v_{t+1} = \min\{v_t - ac, g_n\}$

: 전방의 정지차량과 당 차량과의 비점유된 셀의 개수가 감속영향권보다 작으면 “Slow-to-stop”

규칙에 의해 감속한다.

[단계 3] 불규칙적인 감속(with p_{noise})

if($g_{uo} > mx_n$)이면

$$v_{t+1} = \max\{v_{t+1} - ac, 0\} \quad \text{if}(p_{noise} \geq p_{random})$$

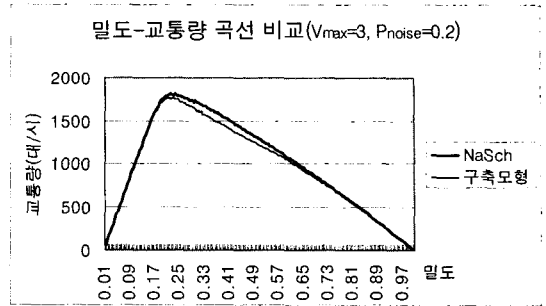
따라서 본 연구에서 구축된 CA차량추종모형은 차량의 가속과 주행시 NaSch모형과 동일한 규칙에 따르며, 정지차량의 후미에 도착하는 감속상황에서는 "Slow-to-start"규칙이 적용된다.

2) 구축된 차량추종모형의 구현 결과

<그림 6>은 "Slow-to-stop"규칙을 NaSch모형에 적용한 결과를 시공도로 보여주고 있다. 그리고 실선은 차량의 궤적을 나타내며, 궤적의 기울기는 차량의 속도를 나타낸다. <그림 4>에 비하여 차량은 대기의 후미에 도착하면서 감속을 하게됨으로 기울기는 크게 나타내고 있다. 즉, NaSch모형은 주행-정지로 차량의 도착을 설명하였지만, "Slow-to-stop"규칙을 적용한 경우 대기의 후미에 도착하는 차량은 주행-감속-정지의 과정을 통하여 차량의 도착을 설명하고 있다.

<그림 7>은 $v_{max} = 3, p_{noise} = 0.2$ 조건으로 최대속도 약 60kph, 용량 1,800대/시에 해당하며, 결정론적 "Slow-to-stop"규칙을 적용한 결과를 거시적 교통량-밀도 관계를 통하여 NaSch모형과 비교하여 보여주고 있다.

"Slow-to-stop"규칙은 임계밀도(≈ 0.2)에서 약 0.7 사이에서 NaSch모형에 비하여 교통량을 낮게 설명



<그림 7> NaSch모형과 구축모형의 교통량-밀도관계

하고 있으며, 밀도 약 0.4에서 최대 110대/시의 차이를 보이고 있다. 이것은 정지차량이 발생하는 불안정 교통류를 감속영향권 조정상수를 이용하여 제어할 수 있음을 보여주고 있다.

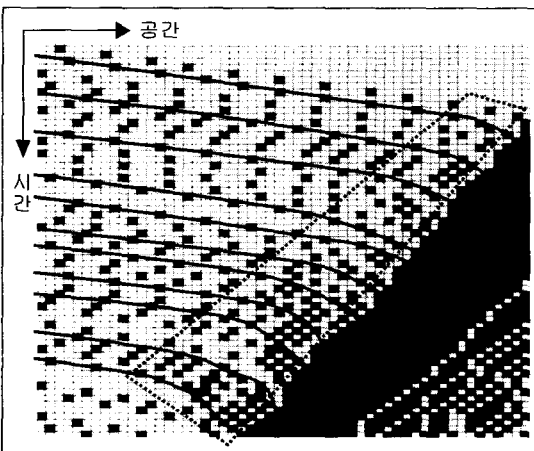
3. 링크전이모형의 구축 및 구현

1) 일반신호의 구축 및 구현

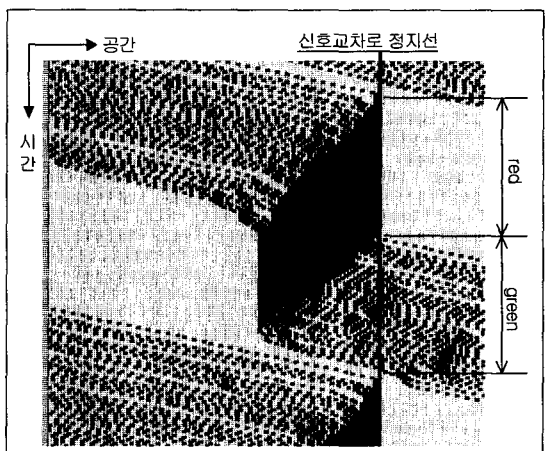
<그림 8>은 Schadschneider(1999)의 일반신호에 본 연구에서 구축된 "Slow-to-stop"규칙을 적용한 결과를 시공도로 보여주고 있으며, 차량은 대기의 후미에 감속하며 도착하고 일정한 대기를 경험한 후 가속하여 방출되고 있다.

2) 확률신호의 구축 및 구현

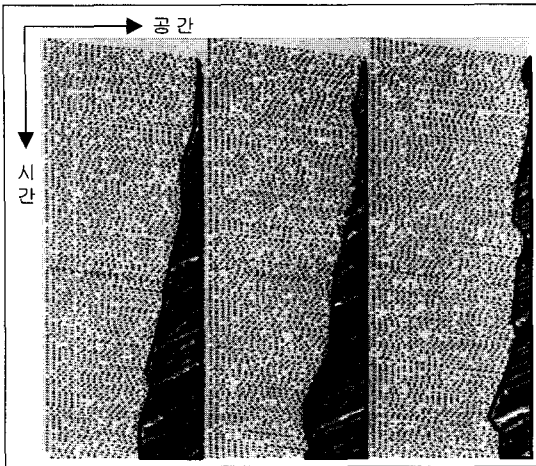
<그림 5>에서 도식화하고 있는 확률모형의 대기행렬 성장의 불안정은 확률의 무작위 추출과정에서 발



<그림 6> 구축된 차량이동모형의 차량도착 형태



<그림 8> Slow-to-stop규칙의 일반신호 적용결과



$p_{trans} = 0.33, p_{trans} = 0.35, p_{trans} = 0.37$

〈그림 9〉 구축된 확률신호의 대기형성 시공도

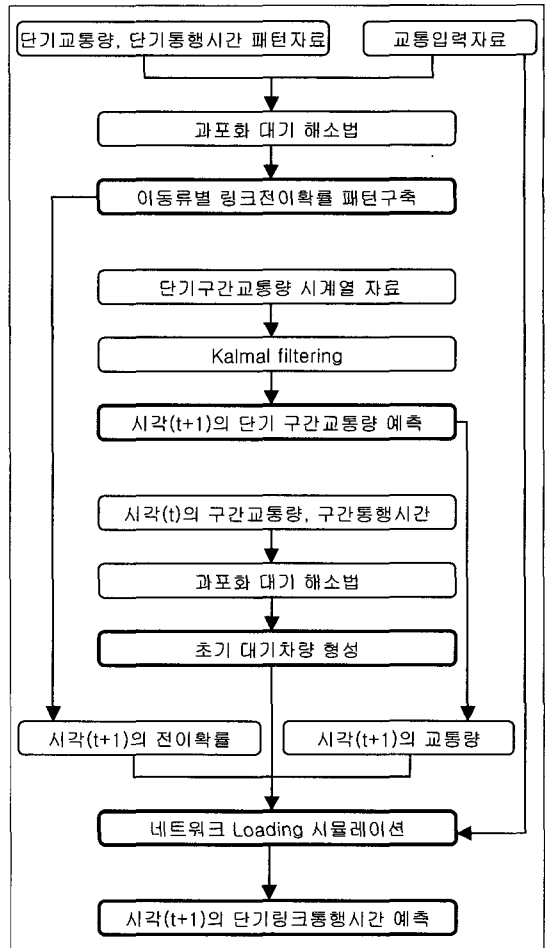
생하게 된다. 즉, 추출된 확률분포는 대수의 범칙에 따르면 안정된 분포를 보이지만 신호교차로의 주기를 140초로 했을 때 발생하는 확률은 140번이다. 따라서 1/1000의 확률을 가지고 복원확률추출법을 이용하여 1000번의 확률을 발생시킬 경우 안정된 분포를 얻을 수 있으나, 140번의 확률을 추출하면 안정된 분포를 얻기 어렵다. 따라서 1/주기길이 만큼의 비복원 확률추출법을 이용하여 무작위 확률을 추출하였다.

〈그림 9〉는 $v_{max}=3, p_{noise}=0.2, \text{교통량}=960\text{대/시}$ 를 조건으로 하며 p_{trans} 가 감소함에 따라 〈그림 5〉보다 대기행렬이 안정적으로 성장함을 보이고 있다.

IV. 통행시간예측 차량모의실험기개발

1. 통행시간예측 모의실험 과정

〈그림 10〉은 단기통행시간예측 모의실험 과정을 보여주고 있다. 시각(t)의 단기구간교통량과 단기구간 통행시간자료를 이용하여 시각(t)의 구간통행시간을 만족하는 링크전이확률(p_{trans})을 추정하고 시각(t)의 마지막 시점에서 대기차량은 시각(t+1)의 초기 링크 대기 차량으로 이전된다. 시계열자료 예측기법인 칼만필터링을 이용하여 시각(t+1)의 구간교통량을 예측하고, 예측된 구간교통량과 본 연구에서 구축된 CA차량추종모형과 링크전이모형을 이용하여 본선링크의 상류부에 차량묶음을 진입시키면서 모의실험을 수행한다.

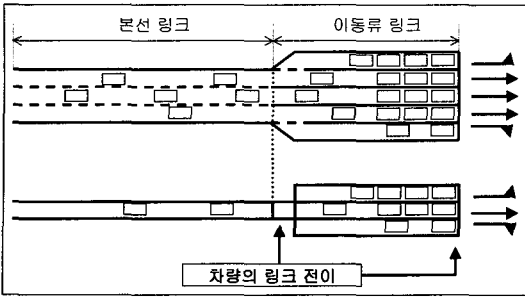


〈그림 10〉 통행시간예측 모의실험 과정도

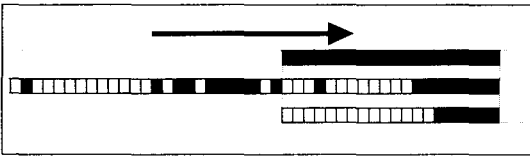
2. 차로 및 차량 표현

본선 및 개별 이동류 차로는 단일차로로 표현되며, 차량은 차량묶음방식을 이용한다. 따라서 일개의 차량 묶음은 차로수 만큼의 차량을 의미하게 된다. 〈그림 11〉에서 본선은 3차로로 구성되고, 이동류는 좌회전 이동류 1차로, 직진 이동류 3차로, 우회전 이동류 1차로로 구성된 일개의 신호교차로 접근로를 4개의 단일 차로 링크로 표현하여 도식화하고 있으며, 일개 차량 묶음은 차로수 만큼의 차량을 의미한다.

차량묶음은 본선링크→개별 이동류링크, 개별 이동류링크→하류부 본선링크로 전이된다. 본선링크→개별 이동류링크의 차량묶음 전이는 이동류 링크의 과포화가 발생하면 확률신호를 이용하여 제어하게 되며, 이동류링크→하류부 본선링크의 차량전이는 하류부



〈그림 11〉 차로 및 차량의 표현



〈그림 12〉 좌회전 Spill over 모의실험

본선링크가 과포화 될 경우 이동류 링크의 차량은 대기하게 된다. 이동류 링크의 과포화 시 전이확률 (p_{trans})은 다음과 같이 계산되며, 〈그림 12〉는 좌회전 Spill over의 모의실험을 보여주고 있다.

$$p_{trans} = \frac{\sum(\text{과포화된 이동류차로수} * para)}{\text{본선차로수}}$$

여기서,

$para$: p_{trans} 조정 상수

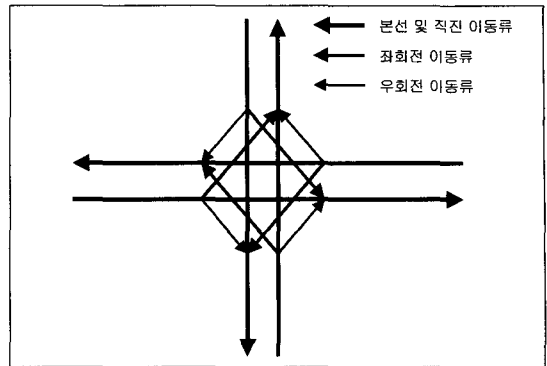
3. 노드-링크 체계

노드-링크 체계는 본선과 개별 이동류(LT, TH, RT) 차로를 분리하여 〈그림 13〉과 같이 개별 이동류가 분리되는 분기형 노드-링크 체계를 구축하였다.

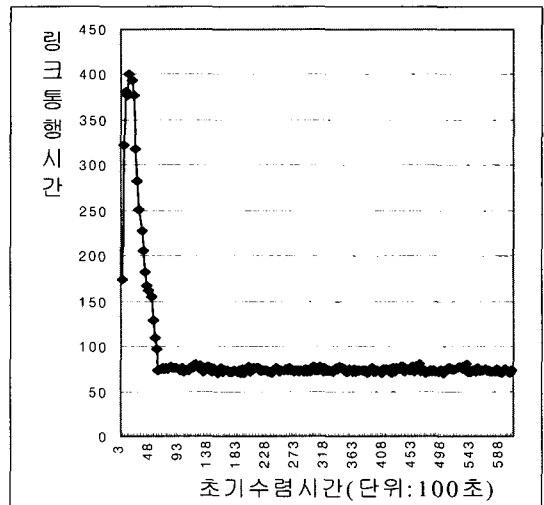
4. 초기대기차량의 형성

초기대기차량의 형성은 시각(t)의 단기구간교통량, 단기구간통행시간 그리고 교통 입력자료와 과포화대기 해소법을 이용하여 단기구간교통량이 단기링크통행시간을 만족시키는 링크상의 대기차량을 산정한다.

과포화대기 해소법은 전이확률(p_{trans})을 0에서 서서히 증가시키면서 초기 링크대기차량을 추정하는 기법이며, 〈그림 14〉는 과포화대기 해소법을 이용한 시간에 따른 구간통행시간의 수렴과정을 보여주고 있다.



〈그림 13〉 노드-링크 체계



〈그림 14〉 구간통행시간의 수렴

이동류별 링크전이확률의 패턴자료 구축은 과포화 대기해소법을 이용하여 시각(t)의 주어진 단기구간교통량과 단기통행시간을 만족하는 전이확률(p_{trans})을 추정하게 된다.

정규신호를 이용할 경우 $p_{trans} = g_e / C$ 을 이용하여 이동류별 유효녹색시간은 다음과 같이 산정한다.

$$g_e = C \times p_{tran}$$

5. 차량발생 및 차량부하

차량류의 발생은 단시간 내에 정확한 차량류음을 발생시키기 위하여 1초당 차량류음을 발생빈도를 이용하여 차량류음을 발생시켰으며, 발생빈도의 누적값이 1을 넘을 경우 일개의 차량류음을 발생시켰다. 발생된 차량류음은 가상링크에 대기하였다가 유입 링크의

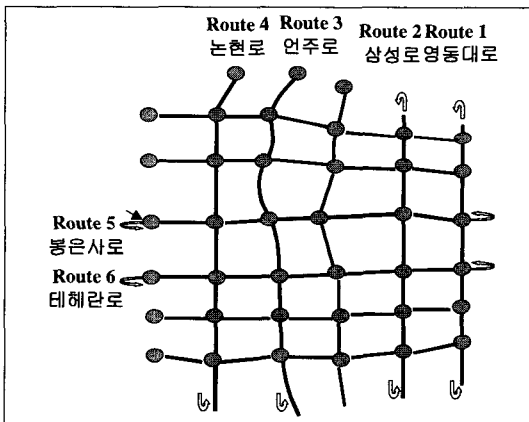
상류부에 진입공간이 확보되면 진입하게 된다.

V. 구축모형의 적용

1. 네트워크 및 평가기준 설정

1) 네트워크 설정

구축모형을 적용하기 위하여 설정된 적용 네트워크의 공간적 범위는 <그림 15>와 같은 강남구 일대로서 네트워크 규모는 동서방향 6개축, 남북방향 5개축으로 구성된 11개축의 가로망으로서 30개의 신호교차로로 구성된다. 또한 시간적 범위는 평일 오전 침두 2시간(7시~9시)으로 설정하였다.



<그림 15> 모형적용 네트워크

2) 평가기준 설정

분석에 이용되는 예측을 위한 시간간격은 5분이며, 통계적 검정과 상대적인 평가를 수행한다.

(1) 상대적 평가지표

다음의 상대적 평가지표를 이용하여 시계열자료의 추세에 대한 예측력을 상대적으로 평가한다.

• RMSE(Root Mean Square Error)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x(i) - \hat{x}(i)|^2}$$

• MAE(Mean Absolute Error)

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x(i) - \hat{x}(i)|$$

(2) t 검정 : 쌍체비교

분석시간동안의 모든 링크의 시간대별 통행시간 예측치와 실측치를 한 쌍으로 쌍체비교를 통한 t검정을 수행하며, 귀무가설은 다음과 같다.

$$\text{귀무가설}(H_0) : \delta = 0$$

여기서,

δ : 실측 통행시간과 예측 통행시간 쌍체값 차의 모평균

2. 결과분석

기존 시계열자료 예측기법은 공통적으로 Time Lag 문제를 극복하기 어려운 한계를 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 시계열자료 예측기법 중 수행속도가 빠르고 정확도가 우수하다고 알려진 칼만필터링 기법을 이용한 예측값과 모의실험을 통해 예측된 값을 Time Lag의 측면에서 비교하였다. 그리고 모의실험을 통한 링크통행시간 예측기법이 Time Lag문제를 기존의 예측기법에 비하여 어느 정도 극복하고 있는지를 통계적 검정을 통해 분석하였다.

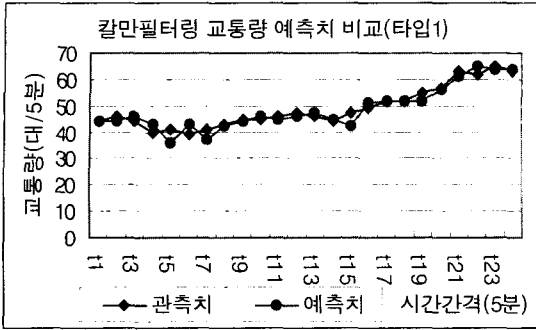
1) 시계열자료의 추세에 대한 분석

시계열자료의 추세는 다음의 3개 타입으로 구분하여 분석한다.

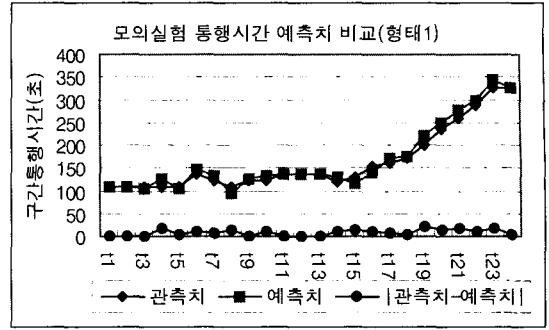
- 타입1 : 서서히 증가
- 타입2 : 파동
- 타입3 : 급격한 증가 후 급격한 감소

<그림 16>에서 <그림 18>은 칼만필터링을 이용하여 타입별로 예측된 장래 교통량의 추세를 보여주고 있다. 교통량은 급변하지 않고 서서히 증가-감소하는 경향을 보인다. 따라서 심각한 Time Lag문제가 발생하지 않아 예측력은 우수하게 나타나고 있다.

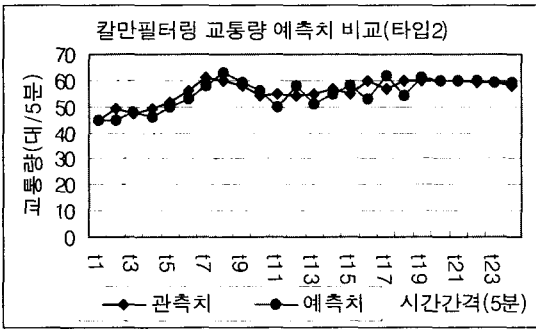
<그림 19>에서 <그림 24>는 칼만필터링과 모의실험의 단기링크통행시간 예측 정도를 3개 타입의 시계열자료 추세로 각각 보여주고 있다. 칼만필터링 기법을 적용한 경우 시각(t+1)에서 관측된 통행시간이 시각(t)에서 관측된 통행시간에 비해 크게 증가 또는 감소하는 시점(그림의 ↓표시)에서 절대 오차값은 높게 나타나고 있어 Time Lag 문제가 발생하고 있음을



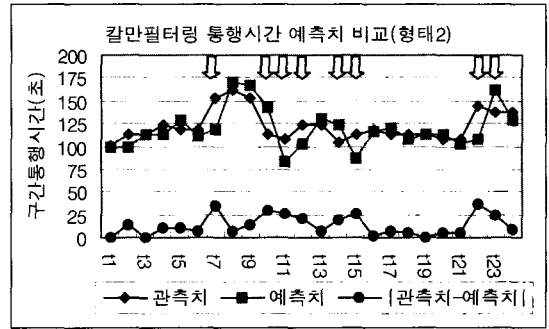
〈그림 16〉 칼만필터링 예측 교통량 추세(타입1)



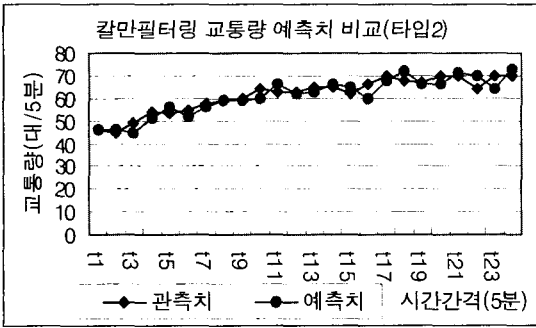
〈그림 20〉 모의실험 예측 통행시간 추세(타입1)



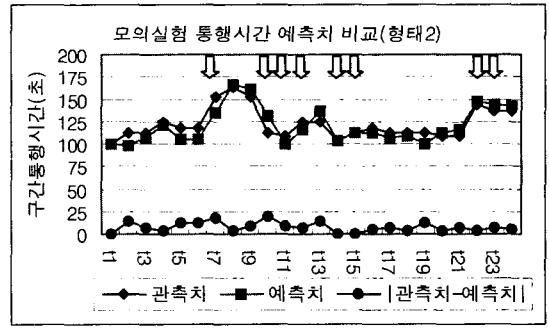
〈그림 17〉 칼만필터링 예측 교통량 추세(타입2)



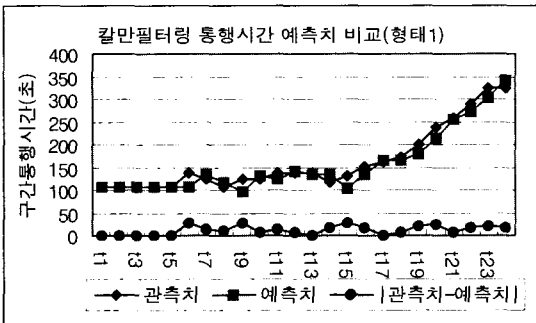
〈그림 21〉 칼만필터링 예측 통행시간 추세(타입2)



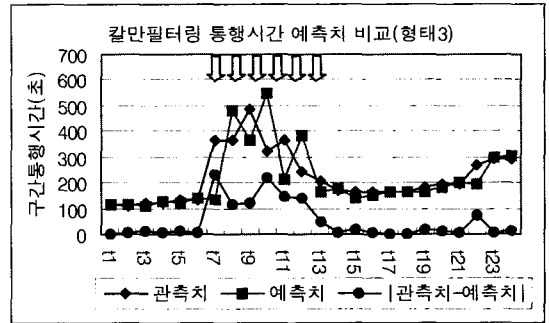
〈그림 18〉 칼만필터링 예측 교통량 추세(타입3)



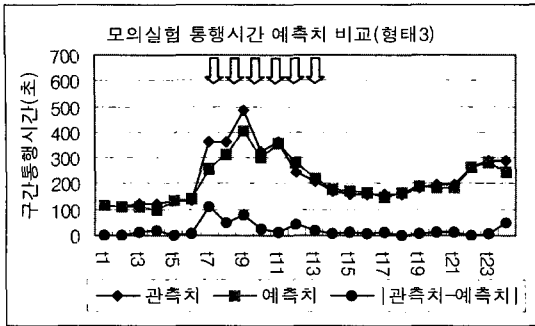
〈그림 22〉 모의실험 예측 통행시간 추세(타입2)



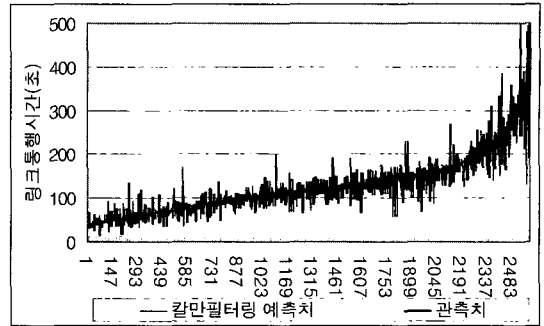
〈그림 19〉 칼만필터링 예측 통행시간 추세(타입1)



〈그림 23〉 칼만필터링 예측 통행시간 추세(타입3)



〈그림 24〉 모의실험 예측 통행시간 추세(타입3)



〈그림 25〉 칼만필터링 예측치와 관측치 비교

〈표 2〉 칼만필터링과 모의실험의 예측력 비교

자료타입	타입1		타입2		타입3	
	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE
칼만필터링	15.60	12.05	17.23	13.27	87.17	51.25
모의실험	10.05	8.04	9.15	7.62	33.51	20.65

알 수 있다. 그리고 〈그림 23〉과 같이 Time Lag 현상은 시계열자료의 진폭이 커질수록 절대 오차값은 크게 나타나고 있으며 Time Lag가 발생하는 시점에서 시계열자료의 추세를 왜곡시키고 있다. 반면 모의실험을 적용한 경우 예측오차를 수반하지만 Time Lag 문제를 해결하면서 시계열자료의 추세를 왜곡시키지 않고 구간통행시간을 예측하고 있다.

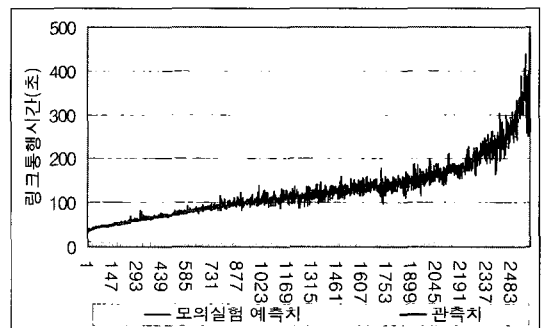
칼만필터링과 모의실험의 통행시간 예측력을 상대적 평가지표로 비교한 결과는 〈표 2〉와 같으며, 모의실험 예측력이 우수한 것으로 나타났다.

2) t 검정 결과

분석시간동안의 모든 링크에 대한 실측값을 칼만필터링과 모의실험의 예측값과 t검정을 수행한 결과는 〈표 3〉과 같으며, 유의수준 1%, 5% 내에서 모의실험 예측값은 실측값과 모평균이 동일하다는 결론을 내릴 수 있으며, 칼만필터링 예측값은 실측값과 모평균이 동일하지 않다는 결론을 내릴 수 있다.

〈표 3〉 예측기법별 통행시간 예측치 t검정 결과

예측기법	t통계량	양측검정 기각치		판단
칼만필터링	4.77	유의수준(5%)	1.97	기각
		유의수준(1%)	2.58	기각
모의실험	1.95	유의수준(5%)	1.97	채택
		유의수준(1%)	2.58	채택



〈그림 26〉 모의실험 예측치와 관측치 비교

VI. 결론 및 향후 연구과제

1. 결론

본 연구의 결론을 CA차량추종모형, 모의실험 수행시간, 그리고 단기구간통행시간의 예측력 향상으로 구분하여 설명하면 다음과 같다.

첫째, "Slow-to-stop"규칙을 이용함으로써 기존의 CA차량추종모형이 미시적 측면에서 가지고 있는 차량의 비현실적인 감속과정을 보다 현실적으로 모형화하면서 교통류의 거시적 관계를 설명하는 CA차량추종모형을 구축하였다.

둘째, 미시적 모형과 거시적 모형의 대규모 네트워크 시뮬레이션의 관계는 Trade off 관계라고 할 수 있다. 본 연구에서는 차량류움(Packet)방식을 적용함으로써 절충점을 모색하였으며, 구축모형의 적용에 이용된 네트워크를 2시간 모의실험하는데 CPU 0.5G, HDD 8G의 컴퓨터로 소요된 시간은 약 4분으로 대규모 가로망에 적용이 가능한 모형을 구축하였다.

셋째, 기존의 시계열자료예측모형이 고려할 수 없었던 이동류의 과포화, 뒷막힘 현상 등 단속류에서

발생하는 교통류의 메커니즘을 고려하고 기존의 시계열자료 예측기법이 해결할 수 없었던 Time Lag 문제를 상당히 극복함으로써 보다 정확한 단기 링크통행시간을 예측하였다.

2. 향후 연구과제

향후 수행되어야 할 과제로는 차량의 미시적 행태, 링크전이확률의 발산 문제로 설명하면 다음과 같다.

첫째, NaSch모형은 차량의 단위시간 가-감속도량을 7.5m/초로 설정하였으며, 본 연구에서는 6m/초를 적용하였다. 따라서 최대속도가 5cell/초일 경우 정지 차량은 5초 후에 100kph이상의 속도에 도달하게 되어 차량의 가속을 비현실적으로 설명하고 있다. 그러나 CA차량추종모형이 소개될 당시의 컴퓨터 성능에 비하여 현재의 컴퓨터 연산수행속도는 급격히 향상되었다. 따라서 보다 세밀하게 차량의 가-감속을 묘사하기 위해서는 Cell 길이를 1.5~2.5m로 조정해야 한다. Schreckenburg(2002)는 셀길이 1.5m를 고속도로의 분석에 적용하였으며, 이것은 단위가속도 1.5%으로서 정지차량이 100kph에 도달하는데 소요되는 시간은 약 19초이다.

둘째, 과포화대기해소법을 이용한 링크전이확률의 추정시 링크가 과포화 되었을 경우 링크전이확률이 발산하는 경우가 발생하였으며 이 부분에 대하여 추후 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. 장현호(2002), "CA모형을 이용한 대규모 가로망 구간통행시간 예측에 관한 연구", 서울시립대학교 교통공학대학원 교통공학석사논문.
4. K. Nagel, and M. Schreckenberg(1992), "A cellular automaton model for freeway traffic", J. Phys. I France 2:2221.
5. TRANSIMS, "The TRansportation ANalysis and SIMulation System project", the Los Alamos National Laboratory.
6. M. Schreckenberg and D. E. Wolf(1997), "Traffic and Granular Flow 97", Springer.
7. D. Helbing H. J. Herrmann, M. Schreckenberg, D. E. Wolf(1999), "Traffic and Granular Flow 99", Springer.
8. P. M. Simon, K. Nagel(1998), "Simplified cellular automaton model for city traffic", Physical Review E. Copyright by The American Physical Society.
9. Mohinder S. Grewal, Angus P. Andrews (1993), "Kalman Filtering Theory and Practice", Prentice Hall.
10. M. Schreckenburg(2002), "Simulation of the Autobahn Traffic in North Rhine-Westphalia, International Symposium on Transport Simulation", edited by R. Kitamura, M. Kuwakara.

- ✉ 주 작 성 자 : 장현호
 ✉ 논문투고일 : 2002. 10. 2
 논문심사일 : 2002. 11. 12 (1차)
 2002. 11. 27 (2차)
 2003. 2. 5 (3차)
 심사판정일 : 2003. 2. 5
 ✉ 반론접수기한 : 2003. 6. 30

which drivers' route choice was influenced by uncertain information. In particular, this paper investigates the effect of qualitative information on route choice when drivers face a choice with different degrees of uncertain information. The SP survey was conducted and route choice logit models were estimated. We also applied Prospect Theory to the analysis of drivers' decision making under uncertain information.

The main findings are firstly, drivers tend to prefer a route with information than(to) one without information. This indicated that providing charge information encouraged drivers to choose the routes for which information is provided in preference to those for which it is not provided. Secondly, drivers also prefer a route with a certain and precise information over one with uncertain and imprecise information. Thirdly, when the information is given as a range, the size of the range of the information influenced route choice slightly and as the range of the charge increases, the route becomes slightly less unattractive. Fourthly, when the information is given as a range, drivers' route choices are influenced more by the median value of the ranges than by the size of the overall ranges of the information.

Application of Prospect Theory to the results explains the way drivers may be interpreting the choice situation and how they make a route choice in response to uncertain information. The results of this paper implicate that drivers' decision making under uncertainty seem to be very complicated and flexible, depending on the way drivers interpret the choice situation. Therefore, it is recommended to apply wider related theories to the analysis of the drivers' behaviour.

A Study on Link Travel Time Prediction by Short Term Simulation Based on CA

LEE, Seungjae · CHANG, Hyunho

There are two goals in this paper. The one is

development of existing CA(Cellular Automata) model to explain more realistic deceleration process to stop. The other is the application of the updated CA model to forecasting simulation to predict short term link travel time that takes a key rule in finding the shortest path of route guidance system of ITS.

Car following theory of CA models don't makes not response to leading vehicle's velocity but gap or distance between leading vehicles and following vehicles. So a following vehicle running at free flow speed must meet steeply sudden deceleration to avoid back collision within unrealistic braking distance. To tackle above unrealistic deceleration rule, "Slow-to-stop" rule is integrated into NaSch model. For application to interrupted traffic flow, this paper applies "Slow-to-stop" rule to both normal traffic light and random traffic light. And vehicle packet method is used to simulate a large-scale network on the desktop.

Generally, time series data analysis methods such as neural network, ARIMA, and Kalman filtering are used for short term link travel time prediction that is crucial to find an optimal dynamic shortest path. But those methods have time-lag problems and are hard to capture traffic flow mechanism such as spill over and spill back etc. To address above problems, the CA model built in this study is used for forecasting simulation to predict short term link travel time in Kangnam district network. And it's turned out that short term prediction simulation method generates novel results, taking a crack of time lag problems and considering interrupted traffic flow mechanism.

A Route Search of Urban Traffic Network using Fuzzy Non-Additive Control

LEE, Sang Hoon · KIM, Sung Hwan

This paper shows alternative route search and preference route search for the traffic route search,