

■ 論 文 ■

CA(Cellular Automata) 모형을 이용한 고속도로 돌발상황 영향 분석 교통 시뮬레이션 모형 개발

Development of a traffic simulation model analyzing the effects of
highway incidents using the CA(Cellular Automata) model

천 승 훈

(한국철도기술연구원 연구원)

노 정 현

(한양대학교 도시대학원 교수)

목 차

- I. 서론
 - II. 이론적 배경
 - 1. 돌발상황(Incident)
 - 2. CA(Cellular Automata) 모형
 - III. 시뮬레이션 프로그램의 개발
 - 1. 시뮬레이션 프로그램의 개요
 - 2. 교통 시뮬레이션 프로그램의 개발
 - IV. 시뮬레이션 모형의 수행 및 평가
 - 1. 교통류의 속도 비교
 - 2. 교통류의 차두시간 비교
 - V. 고속도로 돌발상황의 영향 분석
 - 1. 고속도로 돌발상황의 유형 분류
 - 2. 유형별 돌발상황의 영향 분석
 - 3. 유형별 총 통행시간과 지체시간 변화
 - VI. 결론
 - 1. 결론
 - 2. 향후 연구과제
- 참고문헌

Key Words : CA(Cellular Automata) model, Incident, ITS, VDS, GM model

요 약

본 연구에서는 CA(Cellular Automata)규칙을 이용하여, 돌발상황의 영향을 분석할 수 있는 시뮬레이션 모형을 구축하고, 실시간 자료인 VDS 자료와 현장측정 자료를 이용하여 시뮬레이션 모형을 검증하였다. 이렇게 구축된 시뮬레이션 모형을 이용하여, 고속도로상에서 돌발상황이 발생하였을 때의 영향을 분석하였다. 그 결과는 5% 신뢰구간에서 통계적으로 유의함으로 나타났다. 돌발상황의 영향을 분석하기 위해서 돌발상황의 지속시간과 교통량의 변화에 따른 돌발상황의 유형을 분류하였고, 각각의 돌발상황 유형에 따른 영향을 분석하였다. 이때, 돌발상황에 의한 영향은 구간 통행시간의 변화와 혼잡 지체시간의 변화를 통해서 분석하였다.

결과에 따르면, 교통량이 적을 때는 교통류가 돌발상황에 의해서 거의 영향을 받지 않았고, 교통량이 증가함에 따라, 돌발상황에 의한 영향이 점점 더 커지는 것으로 나타났다. 또한, 교통량이 2000대/시를 넘어설 때는 돌발상황이 발생하지 않더라도, 교통량의 증가에 따라 혼잡지체가 자연스럽게 발생하는 것으로 나타났고, 돌발상황이 45분 동안 계속될 경우에는 약 425~722대·시의 지체가 발생하였다.

1. 서론

본 연구에서는 CA(Cellular Automata)규칙을 이용하여, 돌발상황의 영향을 분석할 수 있는 시뮬레이션 모형을 구축하고, 실시간 자료인 VDS 자료와 현장측정 자료를 이용하여 시뮬레이션 모형을 검증하였다. 이때, 모형의 정확성을 살피기 위해, 기존의 GM모형에 의한 시뮬레이션 결과를 함께 비교하였다. 이렇게 구축된 시뮬레이션 모형을 이용하여, 고속도로상에서 돌발상황이 발생하였을 때의 영향을 분석하였다. 돌발상황의 영향을 분석하기 위해서 돌발상황의 지속시간과 교통량의 변화에 따른 돌발상황의 유형을 분류하였고, 각각의 돌발상황 유형에 따른 영향을 분석하였다. 이때, 돌발상황에 의한 영향은 구간통행시간의 변화와 혼잡 지체시간의 변화를 통해서 분석하였다.

II. 이론적 배경

1. 돌발상황(Incident)

교통혼잡은 반복적 혼잡(recurrent congestion)과 비반복적 혼잡(nonrecurrent congestion)으로 분류할 수 있다. 반복적 혼잡은 교통수요가 도로의 이용 가능한 용량을 초과했을 경우에 지체와 정체를 반복하는 혼잡을 의미한다. 비반복적 혼잡은 건설, 유지보수, 행사와 같이 예측할 수 있는 사건들과 교통사고, 차량의 고장, 급작스런 기후변화 등 예측할 수 없는 사건들에 의해서 발생하며, 이러한 비반복적 혼잡의 원인이 되는 상황들을 돌발상황(incident)¹⁾이라고 한다.

2. CA(Cellular Automata) 모형

CA모형은 차로에 위치하는 차량과 차량 사이의 관계를 몇 가지의 규칙으로 정해놓고, 이러한 규칙에 의거해서, 각 차량의 특성을 분석하고자하는 기법으로,

Nagel과 Schreckenberg에 의해 소개되었다(1992). CA모형의 규칙은 크게 단일차로 규칙과 다차로 규칙으로 나누어 진다.

1) 단일 차로 교통류 규칙

시뮬레이션 규칙은 가속, 감속, 차로 변경, 운전자의 습성, 차의 이동으로 구분된다. 이 규칙들을 적용하기 위해서 시스템의 매개변수를 설정하는 과정이 필요하다

Nagel과 Schreckenberg이 제안한 NaSch모형은 CA 규칙을 적용한 고속도로 시뮬레이션 모형으로 기본 규칙은 다음과 같다.

NaSch모형

(1) 가속 : $v \rightarrow \min(v+1, v_{\max})$

(2) 감속 : $v \rightarrow \min(v, gap)$

(3) 운전자행태 : $v \rightarrow \min(v-1, 0)$

with probability p

(4) 차량 이동 : $x \rightarrow x+v$

위에서 v 는 속도, v_{\max} 는 최대속도, x 는 차량위치, gap 은 앞차량에서 자신의 차량까지 앞에 놓여 있는 공간을 단위 길이(5m)로 나눈 수를 각각 의미한다²⁾.

2) 다차로 교통류 규칙

앞서 제시된 모형은 1차로 고속도로 모형으로 2차로 이상의 고속도로에 적용하기 위해서는 차로 변경 규칙을 추가해야만 한다.

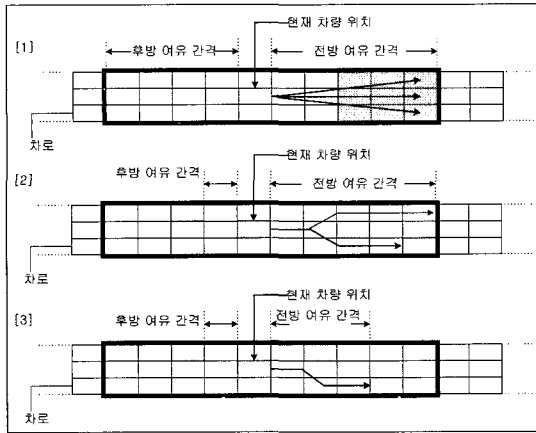
<그림 1>³⁾은 분석 범위내에 위치하고 있는 차량이 이웃 차량과의 상호관계속에서 차량의 이동 방향을 어떻게 결정하는지를 나타내고 있다. 즉, [1]은 전방에 차량이 없으므로, 현재 차량은 어느 차로로도 변경이 가능하다는 것을 나타내며, [2], [3]은 전방과 후방에 차량이 있을 경우, 현재 차량이 차로 변경 할 수 있는 전·후방 여유 간격을 나타내고 있다. 이러한 전·후방 여유 간격과 차량들의 속도에 따라서, 차량의 차로 변경 여부가 결정된다. 위의 차량 상호

1) incident는 유고로 번역되기도 하나, ITS 국가기본계획에서는 incident를 돌발상황으로 정의하고 있다.

2) 각 식에서 제시된 변수와 상수값들의 단위는 단위 셀(cell)이다. 즉, 차량의 속도는 단위시간(초)당 몇 개의 셀을 움직일 수 있는가로 나타낸다. 따라서, 전방차량과의 여유간격이 3cell 일 때, 차량의 속도가 4cell이면 차량은 차로변경을 하거나, 속도를 감속해야 한다.

(이 시뮬레이션 모형은 time-based 모형이다.)

3) 자료, 신승원, 1999.



〈그림 1〉 상호관계에 의한 차량의 이동방향

관계를 표현하기 위해서, 앞선 NaSch모형에 차로 변경 규칙을 추가한다. 일반적으로 차로 변경 규칙은 대칭형과 비대칭형으로 나누어진다. 대칭형은 모든 차로의 차가 차로 변경이 가능한 경우이고, 비대칭형은 저속차로와 고속차로가 나누어진 경우로 한쪽 차로에서 다른 쪽 차로로의 변경은 가능하지만 그 반대는 적용되지 않는 경우이다. Rickert et al(1996)는 다음 2가지 조건을 만족하는 경우에는 차량이 차로를 변경하는 대칭적 모델이 된다고 하였다.

- 동기 유발 조건
 - (1) $v_{hope} > gap$, with $v_{hope} = \min(v + 1, v_{max})$
- 안정성 조건
 - (2) $gap_{other} > gap$
 - (3) $gap_{back} \geq v_{max}$

위 수식에서 gap , gap_{other} , gap_{back} 은 바로 앞에 이동중인 차량과의 간격과 차로 변경을 원하는 이웃 차로에서 이동중인 앞, 뒤 차량과의 간격을 의미한다.

III. 시뮬레이션 프로그램의 개발

1. 시뮬레이션 프로그램의 개요

본 연구에서 개발한 시뮬레이션 프로그램은 기본구간 2차로 도로에서 주어진 교통환경에 따라 차량이 CA 모형에 의한 차량추종과 차로변경을 통하여 차간거리와 속도를 선택하여 주행하는 교통류 행태를 시뮬레이션

〈표 1〉 시뮬레이션의 개요

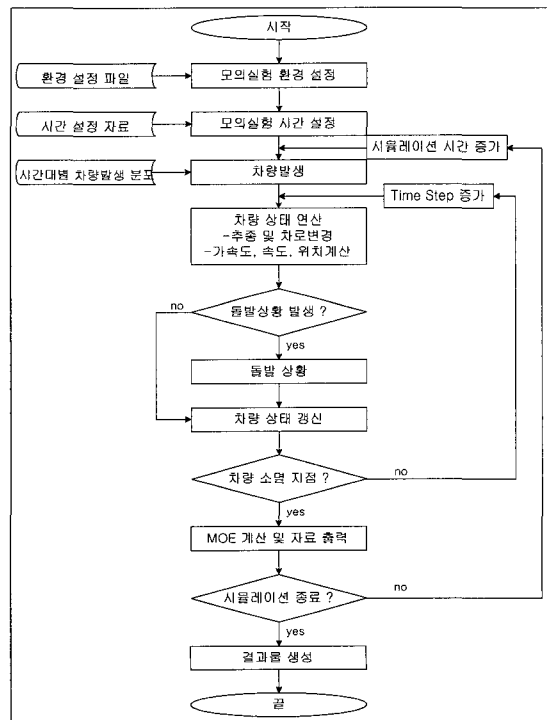
내 용	기 본 설 정
시뮬레이션 구간	2차로 기본구간(차로폭 3.5m)
시뮬레이션 길이	10km
시뮬레이션 시간	2hour
시뮬레이션 가정	차량은 승용차로만 구성 (차량길이 : 5m)

하기 위한 시뮬레이션 모형이다. 시뮬레이션의 개요를 간단히 살펴보면 〈표 1〉과 같다.

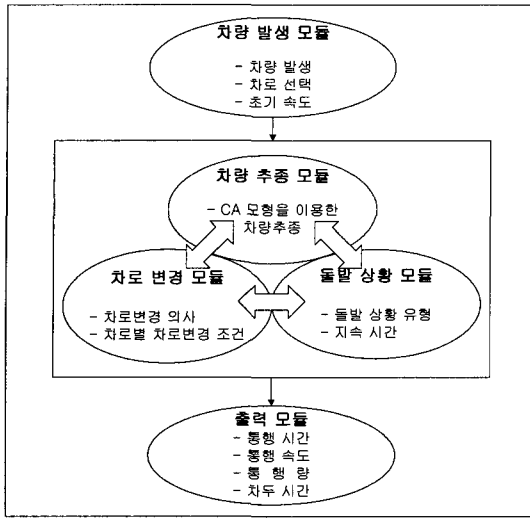
2. 교통 시뮬레이션 프로그램의 개발

1) 시뮬레이터의 구성체계

교통 시뮬레이션 모형의 주요 골격은 정해진 시간 간격, 또는 특정 사건이 발생하였을 때마다 일련의 모듈을 반복하는 것으로 이루어진다. 시뮬레이션의 전체적인 흐름도와 모듈별 개념도는 각각 〈그림 2〉와 〈그림 3〉과 같다. 시뮬레이션은 시뮬레이션 파라미터, 도로 네트워크 표현, 그리고 시나리오 정의로 시작한다. 일단 시뮬레이터가 초기화되면, 반복과정이 시작된다.



〈그림 2〉 시뮬레이션의 흐름도



〈그림 3〉 모듈별 개념도

본 모형은 차량의 이동을 표현하는데 있어서 time-base 시뮬레이션을 사용한다. 차량추종모듈, 차로변경모듈 그리고, 돌발상황 모듈이 정해진 시간간격마다 호출된다. 이러한 관계를 다이어그램으로 간략하게 표현하면 〈그림 3〉과 같다.

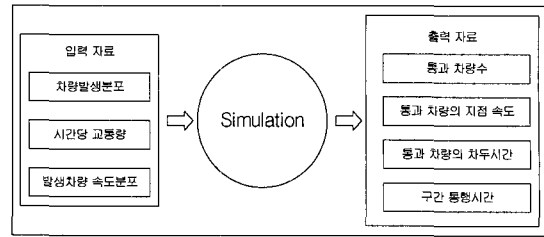
본 연구에서는 모형을 단순화시키기 위하여 몇가지 가정을 전체로 하고 있다. 이러한 가정들은 현실상황을 정확히 묘사하는 데에는 한계를 주지만 전체적인 시뮬레이션의 결과에는 심각한 영향을 주지는 않는다. 본 모형에서 사용된 가정들은 다음과 같다.

- 모든운전자는 동일한 운전능력과 성향을 가진 동질적인 구성원이며,
- 따라서 운전자의 반응시간도 2.5초로 동일하다.
- 네트워크의 종단/횡단구배가 0이다.
- 차량은 승용차로만 구성되며,
- 차로는 2차로로서, 1차로는 추월차로로 고속차량의 진행을 위한 추월차로로 쓰이고, 2차로는 일반적인 주행차로 이다.
- 시뮬레이션 네트워크의 유출입 램프는 없다.

2) 시뮬레이션 모형의 입·출력

(1) 효과척도(MOE)모듈

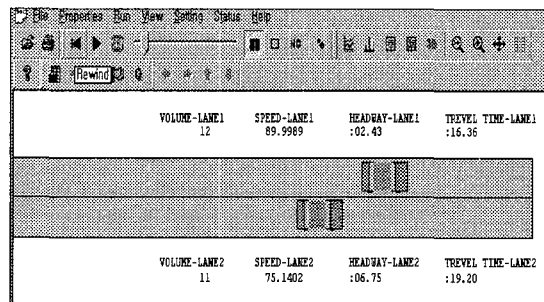
시뮬레이션 기간동안 개별차량의 상세한 속성정보가 저장/갱신된다. 〈그림 4〉는 시뮬레이션 모형에 입력되는 자료와 출력되는 자료의 흐름을 나타낸다.



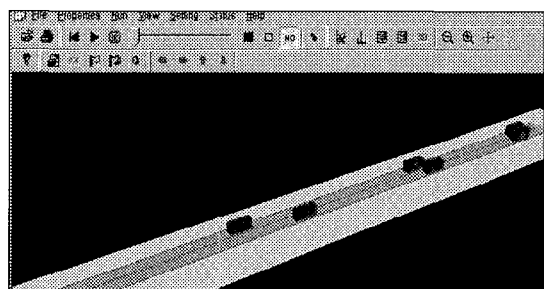
〈그림 4〉 시뮬레이션 모형의 입력과 출력

(2) 그래픽 모듈

본 시뮬레이터는 차량의 흐름을 시각적으로 쉽게 판별할 수 있도록 그래픽을 사용한다. 개별 차량은 색깔을 가진 사각형으로 표현하되, 한지점에서 차량의 지점속도, 차두시간, 경로통행시간 등과 같은 정보가 시각적으로 표현될 수 있도록 모형을 개발하였다. 〈그림 5〉와 〈그림 6〉은 본연구에서 개발된 시뮬레이터에서 구현되는 2차원과 3차원 그래픽이다.



〈그림 5〉 2차원 그래픽



〈그림 6〉 3차원 그래픽

N. 시뮬레이션 모형의 수행 및 평가

1. 교통류의 속도 비교

시뮬레이션 모형을 평가하기 위해, 기존의 차량추

중모형에 의한 차량추종의 결과^{4,5)}와 CA모형에 의한 차량추종의 결과를 비교해 보고, 이를 다시 실제 현장 자료⁶⁾와 비교하여 보았다. 시뮬레이션을 위한 입력 자료는 <표 2>와 같다.

<표 2>의 입력 자료를 넣고서, 시뮬레이션 모형을 실행했을 때의 속도 분포 결과는 <표 3>과 같다.

<표 2> 속도 비교를 위한 입력 자료

구 분	내 용
교통량	1148대/시
속 도	102.43km/h
속도의 표준편차	7.17km/h

<표 3> 속도 자료의 통계 결과

		현장자료 속도분포	GM모형 속도분포	CA모형 속도분포
N	Valid	268	280	277
	Missing	92	80	83
Mean		102.4328	98.7530	102.2315
Std. Error of Mean		.4385	.3575	.4730
Median		101.0000	100.4317	101.8689
Mode		97.00	101.93	80.38
Std. Deviation		7.1793	5.9823	7.8724
Variance		51.5423	35.7882	61.9750
Skewness		1.162	-.148	.232
Std. Error of Skewness		.149	.146	.146
Kurtosis		2.839	-.432	1.062
Std. Error of Kurtosis		.297	.290	.292
Range		46.00	29.57	45.97
Minimum		86.00	86.84	80.38
Maximum		132.00	116.41	126.35
Sum		27452.00	27650.83	28318.11
Percentiles	25	98.0000	92.6176	98.4403
	50	101.0000	100.4317	101.8689
	75	107.0000	102.9355	105.9488

2. 교통류의 차두시간 비교

<표 4>의 입력 자료를 넣고서, 시뮬레이션 모형을 실행

<표 4> 차두시간 비교를 위한 입력 자료

구 분	내 용
교통량	1384대/시
속 도	96.54km/h
속도의 표준편차	8.26km/h

<표 5> 차두시간 자료의 통계 결과

		현장자료 차두시간 분포	GM모형 차두시간 분포	CA모형 차두시간 분포
N	Valid	344	344	334
	Missing	16	16	26
Mean		2.6255	2.7142	2.6219
Std. Error of Mean		.1140	8.202E-02	8.940E-02
Median		1.9500	2.4100	2.3000
Mode		1.20	2.06	2.60
Std. Deviation		2.1144	1.5212	1.6338
Variance		4.4705	2.3140	2.6692
Skewness		3.063	3.059	1.649
Std. Error of Skewness		.131	.131	.133
Kurtosis		14.207	13.339	2.955
Std. Error of Kurtosis		.262	.262	.266
Range		17.90	13.82	9.70
Minimum		.50	.37	.40
Maximum		18.40	14.19	10.10
Sum		903.16	933.70	875.70
Percentiles	25	1.4000	2.0825	1.5000
	50	1.9500	2.4100	2.3000
	75	3.0750	2.8050	2.9000

했을 때의 차두시간 분포 결과는 <표 5>와 같다.

3. 속도와 차두시간의 검증

CA모형에 의한 시뮬레이션 모형을 검증하기 위해, 현장 자료의 속도와 차두시간과 시뮬레이션 결과를 앞절에서 비교하였다. 이를 통계적으로 검증하기 위하여, 대응표본 t-검증을 실시한 결과, 5%의 유의수

4) 김창모(2000)의 논문에서 제시된 것처럼, 각 교통상황에 따라 나타나는 6가지 형태의 GM 모형에 적합한 파라미터를 산출하여 적용한 GM 모형을 이용.

5) GM 모형과의 비교를 위해서, CA 시뮬레이션 모형과 똑같은 조건과 가정 하에서 시뮬레이션 실시.

6) '김창모'에 의해 조사된 자료, 경부선 서울기점 32.5km지점.

준에서 t-value가 각각 0.287, -0.049로, 속도와 차두시간의 현장 자료와 시뮬레이션 모형에 의한 시뮬레이션 결과는 유의한 것으로 나타났다.

V. 고속도로 돌발상황의 영향 분석

1. 고속도로 돌발상황의 유형 분류

본 연구에서 설정한 돌발상황의 지속시간과 교통량의 변화에 따른 돌발상황의 유형을 분류해 보면 <표 6>과 같다.

<표 6> 돌발상황의 유형분류

교통량	지속 시간	유형 분류		교통량	지속 시간	유형 분류	
		대유형	중유형			대유형	중유형
500대/시	정상류	I	1	1500대/시	정상류	V	1
	5분		2		5분		2
	10분		3		10분		3
	·		·		·		·
	·		·		·		·
1000대/시	정상류	II	1	2000대/시	정상류	VI	1
	5분		2		5분		2
	10분		3		10분		3
	·		·		·		·
	·		·		·		·
1300대/시	정상류	III	1	2500대/시	정상류	VII	1
	5분		2		5분		2
	10분		3		10분		3
	·		·		·		·
	·		·		·		·
	45분	10		45분	10		

<표 7> 입력 자료

구 분	내 용
교통량	1264대/시
속 도	100.27km/h
속도의 표준편차	7.77km/h

2. 유형별 돌발상황의 영향 분석

돌발상황 지속시간과 교통량 변화에 따른 돌발상황의 영향을 분석하기 위한 입력 자료⁷⁾는 <표 7>과 같다.

<그림 7>은 돌발상황 지속시간과 교통량을 변화시켰을 때의 구간 통행시간의 변화를 나타내고 있다. 시간당 통과 교통량이 500대 일 때는 돌발상황이 발생하더라도 차량의 흐름에는 아무런 영향을 미치지 않음을 볼 수 있다. 교통량이 증가할수록 구간 통행시간이 증가하다가, 통과 교통량이 도로의 포화교통량이라 할 수 있는 2000대를 넘어서서 부터는 돌발상황이 발생하지 않는 정상류 상황에서도 지체 발생으로 인한 통행시간의 증가가 나타남을 볼 수 있다.

3. 유형별 총 통행시간과 지체시간 변화

<표 8>은 각 유형별 총 통행시간과 지체시간을 산정한 결과이다. 시뮬레이션을 수행하여 나타난 결과를 살펴보면, 돌발상황 발생으로 인한 혼잡지체는 45분간의 돌발상황이 지속되었을 때 약 425~722 대·시의 지체가 발생하는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 교통사고가 발생했을 때, 약 45~60분의 돌발상황이 지속되며, 500~1000대·시 정도의 지체를 유발한다는 Cambridge Systematics의 연구결과와 유사하게 나타났다.

VI. 결론

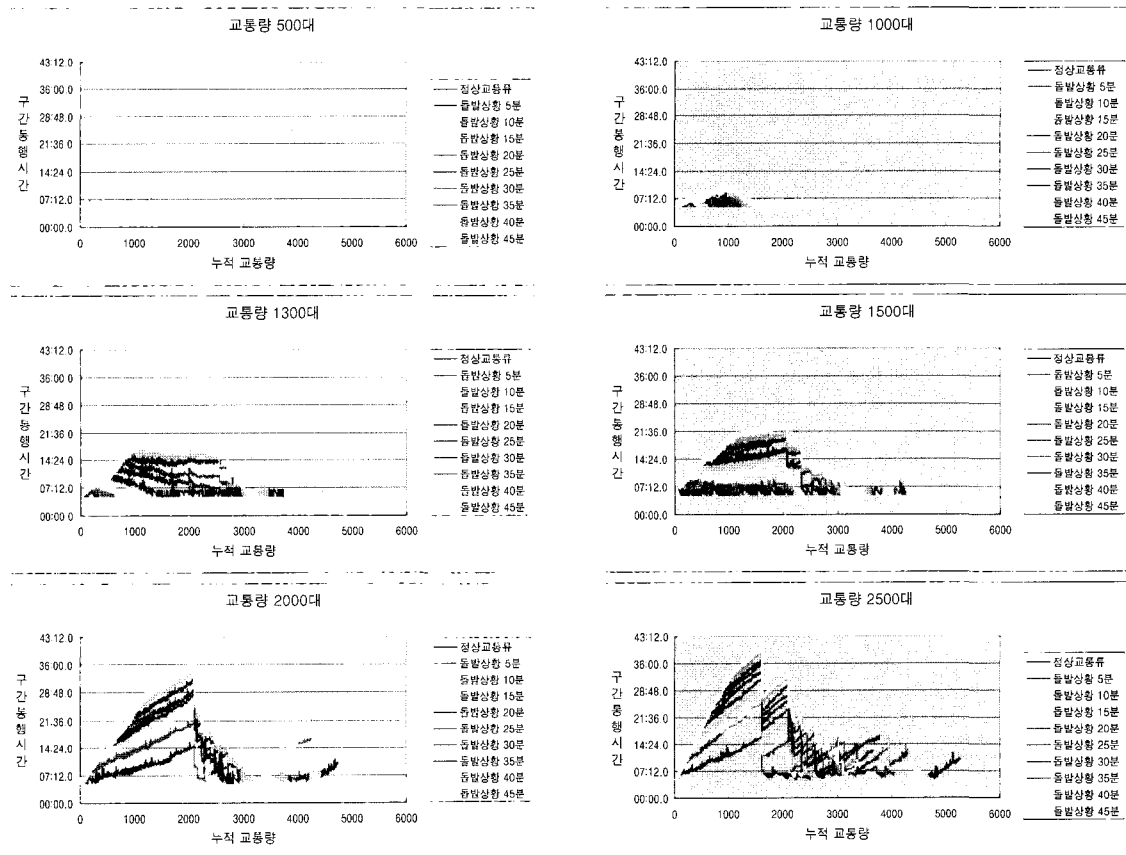
1. 결론

본 연구에서는 돌발상황 발생에 따른 영향을 분석함으로써, 운전자에게 보다 정확하고, 효율적인 정보를 제공하고, 돌발상황 발생으로 인한 혼잡지체를 최소화시킴으로써, 교통류를 신속하고, 효율적으로 관리할 수 있는 교통 시뮬레이션 모형을 개발하였다.

본 연구 수행이 지니는 가치는 다음과 같다.

첫째, CA모형을 이용하여 시뮬레이션 모형을 단순화시켰다. 기존 추종모형들은 상황에 따라서 파라미터를 변환해야 하는 번거로움이 있지만, 본 연구에서

7) 1999년 10월 1일 VDS자료, 영동선 기점 1.8km지점(신갈방향).



〈그림 7〉 지속시간과 교통량 변화에 따른 통행시간의 변화

이용된 CA모형은 실제 교통류 상황에 대한 몇 가지 규칙만으로 차량의 이동을 묘사하였으며, 결과 면에서도 통계적으로 유의함을 확인할 수 있었다.

둘째, 여러 가지 상황에 적용할 수 있는 유연한 시뮬레이션 모형이다. 본 연구에서 개발한 교통류 시뮬레이션 모형은 돌발상황에 대한 분석 외에도, 고속도로상에서 발생할 수 있는 여러 가지 상황들(저속차량 유입에 따른 차량 흐름 분석, 버스전용차로에 대한 분석)에 대한 묘사가 가능한 유연한 모형이다.

셋째, 돌발상황으로 인한 지체시간 분석을 통해서, 운전자에게 보다 정확한 정보를 제공해 줄 수 있다. 현재 우리나라의 돌발상황관리 전략은 막대한 재원을 투자하여 첨단교통시설을 구축하였음에도 불구하고, 단순히 하류부의 혼잡정보만을 제공하는데 그치고 있는 실정이다. 따라서, 돌발상황으로 인한 지체시간의 분석을 통해, 운전자에게 보다 정확한 정보를 제공함으로써, 불필요한 혼잡지체를 줄일 수 있다.

마지막으로, 본 연구에서 개발한 모형은 기존에 개발중인 교통우회시스템의 하부모듈로 이용 가능하다. 기존에 개발되었거나, 현재 개발중인 교통우회시스템들은 돌발상황으로 인한 지체를 최소화시키기 위한, 일종의 돌발상황관리 전략으로써, 돌발상황에 대한 정확한 분석을 토대로, 교통량을 제어할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서 개발한 모형은 교통상황에 대한 시뮬레이션 모니터링과 자료 분석을 통해서 돌발상황이 교통류에 미치는 영향을 분석함으로써, 교통량을 제어하는 교통우회시스템의 하부모듈로서의 활용이 가능하다.

2. 향후 연구과제

본 연구에서는 돌발상황의 발생위치(1차로 또는 2차로)와 차단된 차로수의 변화(1개 차로 차단, 2개 차로 차단, ...)에 따른 파급효과를 고려하지 못했다. 또한, 운전자 행태에 대한 보다 세밀한 연구가 향후 필

〈표 8〉 총 통행시간 및 지체시간 결과

(단위:대·분)

교통량	지속시간	총 통행시간	지체시간	교통량	지속시간	총 통행시간	지체시간
500대/시	정상류	8,408.47	-	1500대/시	정상류	20,410.49	-
	5분	8,413.20	4.73		5분	23,503.14	3,092.65
	10분	8,419.23	10.76		10분	29,122.33	8,711.84
	15분	8,422.09	13.62		15분	35,127.31	14,716.82
	20분	8,427.16	18.68		20분	37,773.54	17,363.04
	25분	8,434.46	25.98		25분	38,931.21	18,520.71
	30분	8,434.43	25.96		30분	43,648.21	23,237.72
	35분	8,434.07	25.59		35분	44,802.41	24,391.92
	40분	8,438.36	29.88		40분	47,321.12	26,910.62
	45분	8,440.49	32.02		45분	51,260.51	30,850.01
1000대/시	정상류	16,146.29	-	2000대/시	정상류	30,932.46	-
	5분	16,202.46	56.16		5분	42,249.54	11,317.08
	10분	16,392.25	245.96		10분	45,836.28	14,903.83
	15분	16,512.17	365.88		15분	49,343.28	18,410.82
	20분	16,734.21	587.92		20분	50,962.53	20,030.08
	25분	17,055.37	909.08		25분	52,886.27	21,953.82
	30분	17,701.32	1,555.03		30분	54,736.41	23,803.95
	35분	17,927.51	1,781.22		35분	59,966.46	29,034.00
	40분	18,588.01	2,441.72		40분	63,467.50	32,535.04
	45분	19,016.05	2,869.76		45분	67,556.28	36,623.82
1300대/시	정상류	18,757.2	-	2500대/시	정상류	30,437.39	-
	5분	19,168.41	411.21		5분	44,629.20	14,191.81
	10분	19,777.19	1,019.99		10분	45,361.19	14,923.79
	15분	21,079.19	2,322.00		15분	51,502.21	21,064.82
	20분	22,055.08	3,297.89		20분	57,319.45	26,882.06
	25분	27,180.20	8,423.01		25분	60,938.08	30,500.68
	30분	31,572.21	12,815.01		30분	64,619.37	34,181.98
	35분	37,646.20	18,889.00		35분	67,006.41	36,569.01
	40분	40,455.10	21,697.90		40분	72,318.56	41,881.17
	45분	44,264.36	25,507.16		45분	73,747.37	43,309.98

요할 것으로 판단된다. 시뮬레이션 모형의 유효성을 검증하기 위해서, 실제 돌발상황이 발생했을 때의 현장 Data를 이용한 검증단계가 필요하다. 마지막으로, 이러한 검증단계를 거쳐 구축된 시뮬레이션 모형을 이용하여, 본 연구에서 가정하고 있는 사항들을 해체시키는 작업이 필요하다.

참고문헌

1. 김상신, "고속도로 교통축에서의 교통우회시스템의

개발", 한양대 석사논문, 1999. 12.

2. 김창모, "차량추종모형 시뮬레이션 프로그램 개발", 한양대학교 대학원 석사 논문, 2000. 6.

3. "고속도로 톨게이트 운영 시뮬레이션 모형 개발" 한국도로공사, 1988, pp.87~92.

4. K. Nagel and M. Schreckenberg, "A Cellular Automaton Model for Freeway Traffic", J. Phys. I, 2, 2221, 1992.

5. Seung-Won Shin, Seong Namkoong, Jong-Ok Choi, "Analysis of Congested Traffic Flows

- on Highway Based on CA Simulation and Hydrodynamic Model", ITS Toronto '99.
6. Kaan Ozbay, Pushkin Kachroo, "Incident Management in Intelligent Transportation Systems", pp.4~6.
 7. Cambridge Systematics, "Incident Management", Alexandria, VA: Trucking Research Institute, Oct. 1990.
 8. M. Rickert, K. Nagel, M. Schreckenberg, A. Latour, "Two lane traffic simulations using cellular automata", Dec., 1995.
 9. K. Nagel, Dietrich E Wolf, Peter Wagner, Patrice Simon, "Two-lane traffic rules for cellular automata: A systematic approach", June, 1998.
 10. Patrice Simon and Kai Nagel, "A Simplified Cellular Automaton Model for City Traffic", Feb., 1998.
 11. R. Barlovic, L. Santen, A. Schadschneider, and M. Schreckenberg, "Metastable states in cellular automata for traffic flow", Apr., 1998.
 12. F. Javier, Gerardo Sanz, "Stochastic comparisons for general probabilistic cellular automata", May, 1999.

✉ 주 작성 자 : 천승훈

✉ 논문투고일 : 2001. 10. 26

논문심사일 : 2001. 11. 19 (1차)

2001. 12. 7 (2차)

심사판정일 : 2001. 12. 7