

□ 論 文 □

# 도시 가로망시설 운영효율평가를 위한 모의실험 모형개발

A Microscopic Traffic Simulation Model for Urban Network Performance Evaluation

河 東 翊

(교통개발연구원 책임연구원)

吳 榮 泰

(아주대 교통공학과 조교수)

丁 竣 夏

(교통개발연구원 연구원)

— 목 차 —

- |                 |              |
|-----------------|--------------|
| I. 서론           | 3. 구성내용      |
| II. 기존의 모의실험 모형 | IV. 적용 및 검증  |
| III. 모형의 개발     | 1. 사례적용      |
| 1. 개요           | 2. 분석결과 및 평가 |
| 2. 모형의 특성       | V. 결론        |

— ABSTRACT —

The purpose of this paper is to develop a microscopic traffic simulation model which is able to both analyze and evaluate signalized urban network and to verify its usefulness in comparison with the other model which has already been released.

The simulation model adopts the General Motors' 5th model for car-following and introduces an unique lane changing rule using acceptable gap. It analyzes single and dual-ring signal phases and generates detector information. So it could be applied to dynamic route guidance systems as well as real time signal control systems.

The results derived from Netsim and the observed data from the real network have been used to test the validity of the proposed model. The result of the test has shown that there are no significant differences between the NETSIM model and the proposed model in estimating travel speed and stopped delay. In optimum offset estimation, it has shown the same results with NETSIM.

The measure of effectiveness, however, derived from this model is slightly better than that of the real network situation. This may be due to the fact that the proposed model does not take into account side frictions from interferences and obstacles.

## I. 서론

당면한 심각한 교통문제를 해결하기 위하여 교통정책 입안기관, 관련 학계 및 연구소에서는 다양한 교통정책 및 교통운영 기법을 연구하고 있다. 교통류 모의실험 모형의 역할은 새로운 정책이나 기법들을 현장에 적용하기에 앞서 그 효율성 및 예상 문제점을 평가하여 시행여부를 결정하도록 도와주게 한다.

이러한 모의실험 모형의 효용성에도 불구하고 교통류 분석 모형에 관한 연구는 매우 미흡하였던 학문분야이다. 우리나라의 경우도 우리실정에 맞게 개발된 모의실험모형은 전무하며 외국에서 개발된 모형들을 그대로 사용해 왔는데, 이는 외국의 운전자행태, 가로망특성 등 교통환경이 우리와 상당히 다르기 때문에 원하는 분석결과를 기대하기 어렵고 이를 수정하여 사용하기에는 더욱 어려움이 있다.

특히 최근의 실시간 신호제어기법이나 주행안내 시스템 등 첨단교통운영기법이 개발됨에 따라 이들을 실험하고 검증하기 위한 새로운 방법이 더욱 요구되고 있는 실정이다. 본 연구의 목적은 이러한 필요성에 부응하여 도시부의 교통류를 분석하고 평가하는 모의실험모형을 개발하고 기존의 모형들과 비교하여 그 유용성을 검증함에 있다.

## II. 기존의 모의실험 모형

### 1. NETSIM (NETwork SIMulation tool)

NETSIM은 FORTRAN으로 개발된 프로그램으로서 분석 가로망내를 주행하는 차량의 운행상태를 매초마다 재현 및 분석하는 것으로서 다음과 같은 주요기능을 제공한다.

- 포화 교통류 상태하의 복합 가로망 모의실험
- 교통류의 실시간 조사에 기초한 동적인 교통류 제어

- 정주기제어 및 감응제어 전략평가
- 신호조건 및 교통여건의 변화에 따른 보정계수 도출

이 모형은 도시내 가로망상에서 경험하게 되는 대부분의 상황을 상당히 섬세한 수준까지 재현해 준다. 즉 신호제어 측면에서는 정주기, multi-dial 및 감응제어까지 그리고 교통운영적인 측면으로는 버스운영, 장애물, 주차, spillback, 좌회전 pocket 넘침 등이 모의실험 될 수 있다[12].

분석되는 효과척도로는 속도, 교통량, 밀도, 지체, spillback, 대기행렬, 회전교통량 등 다양한 결과를 제공해줄 뿐만 아니라 사용자가 정의한 시간간격(time interval)에 대한 가로망 전체, 링크그룹 혹은 가로망내의 단일 링크에 대한 연료소모 및 공기오염도까지 예측해 준다.

또한 사용자 측면에서 사용자 지정인자(user defined factor)들을 많이 제공함으로써 상황에 따라 모형을 조정(calibration) 하기에 상당히 용이하게 설계되어 있다.

반면에 이 모형의 한계는 신호제어체계 분석에 있어서 고정주기 및 감응제어만을 지원하고 실시간 신호제어체계나 변형된 제어전략을 적용할 수가 없다, 또한 신호현시체계에 있어서도 복합(dual-ring) 현시체계를 지원하지 못하고 단일(single-ring) 현시체계만 분석 가능하므로 다양한 형태의 신호현시계획을 적용할 수가 없다는 점이다.

### 2. NEMIS (NETwork Micro-Simulation package)

NEMIS는 이태리의 IENGF 연구소에서 개발한 광역 가로망상의 교통류를 모의실험하기 위한 모형으로 다음과 같은 주요 기능을 제공한다.

- 신호제어 전략 평가
- 교통류 구성 인자의 조정 및 가로망구조의 변경이 교통류에 미치는 영향분석
- 교통류 배분의 시험 및 검증

-주행안내체계 안내전략의 모의실험 및 평가

이 모형의 특징으로는 교통류 배분의 시험과 주행안내체계의 평가가 가능하다는 것이다.

NEMIS에서는 차종을 크게 승용차와 대중교통으로 나누며, 대중교통은 다시 버스와 전차로 세분되며 각 노선별 발생 빈도와 평균 정지시간을 갖는다. 승용차 역시 2가지 타입 즉 고정노선 차량과 O/D 차량으로 구분하여 분석하는데 고정노선 차량은 정해진 일정에 따라 발생되며 정해진 차선을 따라 주행한다고 가정한다. 반면에 O/D 차량은 O/D matrix에 의해서 임의로 발생되며 출발점으로부터 나가는 링크 중에서 선택된 링크로 유입하게 된다. 물론 링크의 선택은 가로망으로 유입하는 임의 링크에 대하여 NEMIS 자체 교통류배분모형에 의하여 결정되는 값에 따라 이루어진다.

링크와 링크가 만나는 교차로 지역에서 차량은 교통신호 및 교통량의 영향을 받으며 진입하게 된다. 교차로에서의 회전선택은 차량이 링크에 진입할 때마다 이루어지며 교통류배분 모형에 결정되는 회전비율을 이용한다.

3. LINTCOSS (Linear Network Traffic Control System Simulator)

LINTCOSS는 일본 Fukuyama Consultants International Co., Ltd.에 의해서 1990년에 수행된 Application of AI Technologies to Traffic Control<sup>[11]</sup> 사업의 일환으로 local controller 및 master controller의 제어기법에 대한 성능평가를 위한 도구로 개발되었다. LINTCOSS의 주요 기능은 다음과 같다.

- microscopic real time simulator
- 4개의 교차로를 포함한 선형 network 시험
- vehicle movement simulation
- simulation of varying traffic
- 100msec 의 simulation resolution
- 다양한 검지기체계 시험

-NEMA 기준의 감응제어 시험

이 모형은 교통류를 재현하여 network 효율성을 진단하기 보다는 신호제어시스템의 기능적인 검증을 주목적으로 개발된 것이다. 따라서 모형의 제약으로는 최대 분석 교차로 수가 4개에 불과하며 미시적 모형의 핵심이론인 차선변경 규칙이 없다. 최대 모의시험 차량대수는 1000대이며 분석가능한 링크의 최대거리는 3km 이다.

III. 모형의 개발

1. 개요

모의실험 방법에는 미시적 모형(microscopic model)과 거시적 모형(macrosopic model)으로 구분할 수 있다. 미시적 모형이라 함은 개별차량을 대상으로 하여 신호제어전략등 주로 교통운영에 관한 분석을 목적으로 하는 모의실험모형으로 차량추종(car-following)방법과 차선변경(lane-changing) 규칙 등의 이론적 배경을 필요로 한다. 거시적 모형은 개별차량의 행태에 의하지 않고 flow rate, 밀도, 속도 등의 관계로 교통류를 표현하므로 주로 광역 가로망을 대상으로 하는 교통계획 등에 적합한 모형이다<sup>[8]</sup>.

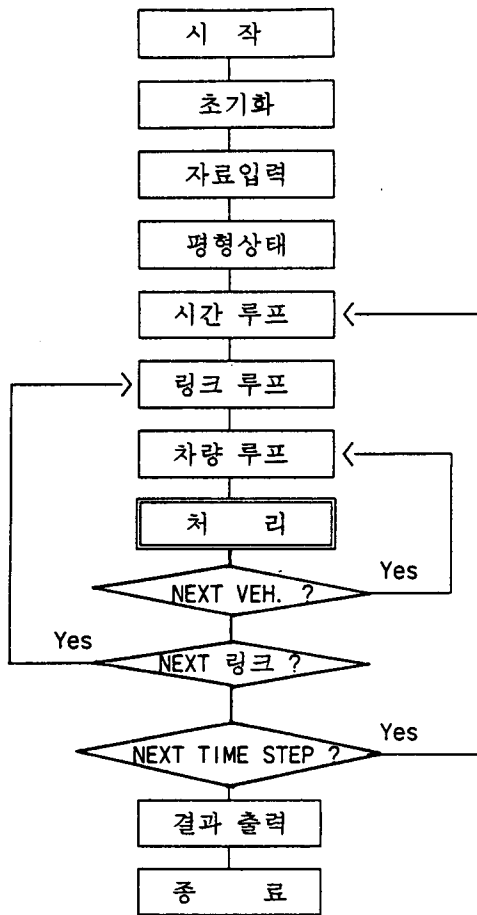
본 연구에서는 모의실험방법으로 미시적 모형을 채택하고 핵심이론인 차량추종 모형은 이미 발표된 모형 중에서 본 연구에 적합한 모형을 선택하여 적용하였으며, 일양분포 난수발생 방법과 분석가로망의 평형상태 판단 기법은 TRAF-NETSIM<sup>[1]</sup>에서 적용한 MLCG(Multiple Linear Congruential Generator)방식과 유입.출 교통량의 변화율에 의한 방법을 수정없이 적용하였다.

차선변경규칙은 허용간격(acceptable gap)을 고려한 독자적인 방식을 개발하여 사용하였으며

1) TRAF-NETSIM은 미국 FHWA에 의하여 1972년 개발된 교통류 모의실험기로서 세계적으로 가장 많이 사용되고 있는 모형이다.

신호제어방식은 시간대별 신호제어는 물론 실시간 신호제어기법까지 분석할 수 있고, 신호현시체계는 단일(single-ring) 및 복합(dual-ring)현시체계를 모두 지원 가능토록 하여 다양한 신호현시계획을 평가할 수 있도록 하였다.

본 모의실험모형의 논리흐름은 <그림 3-1>에서 보이는 바와 같이 일련의 단위모듈들이 주어진 분석시간 동안 순차적으로 수행되면서 각종 현상들을 모의실험하게 된다.



<그림 3-1> 모의실험 모형 계략 흐름도

먼저 차량 유입·유출 교차로에서의 차량발생은 주어진 교통량에 대한 방향별 비율에 의해 방향

별로 생성되며 각 방향별 차량 대기버퍼에 쌓이게 된다. 대기중인 차량은 유입교차로의 현시에 의해 주어진 유출율로 분석 가로망으로 순차적으로 유입되는데 이때 유입링크의 여유공간이 확보되어 있지 않은 경우에는 대기버퍼에 계속 잔류하며 여유공간이 확보될 때를 기다린다.

유입된 차량은 차량추종모형에 의하여 가감속을 행하며 링크를 주행하면서 하류교차로에서의 회전여부에 따라 차선변경을 시도하기도 한다. 각 차량의 회전(좌회전, 직진,우회전)여부는 차량이 주행중인 링크에서 새로운 링크로 진입하는 순간에 각 각의 링크에 주어진 회전확률에 의하여 할당되며, 차량이 유출·유입 교차로를 통과하게 되면 그 차량은 분석대상 가로망에서 제거되며 더 이상의 추적은 행해지지 않는다.

링크의 효과적도는 각차량이 하나의 링크를 벗어날 때마다 산정되며, 각차량의 속성자료는 매 시간단계(사용자정의, 0.1~1초)마다 갱신된다.

## 2. 모형의 특성

### 1) 차량 속성자료

각 차량의 속성자료는 매 시간단계마다 갱신되며 차량이 가로망으로 진입한 시점부터 가로망을 벗어날 때까지 아래와 같은 속성자료를 항상 유지하며 모의실험을 수행하게 된다.

- 차량 ID 번호 : 각 차량의 고유한 번호
- 선행차량 ID : 같은 링크 및 같은 차선을 점유한 선행차량 번호
- 후행차량 ID : 같은 링크 및 같은 차선을 점유한 후행차량 번호
- 유입교차로 ID : 차량이 network으로 진입한 유입교차로 번호
- 링크 ID : 차량이 현재 주행중인 링크 번호
- 점유차선번호 : 차량이 점유중인 차선 번호
- 차종 : 대·소형 차량 구분

- 회전 코드 : 하류부 교차로에서의 회전여부(좌, 직, 우)
- 가로망 진입시간 : network로 진입시의 시간
- 지체시간 : 점유링크에서의 누적지체시간
- 총주행거리 : 차량이 주행한 누적주행거리
- 차량속도 : 차량의 속도
- 가·감속도 : 차량의 가·감속도
- 차량위치 : 현재 차량의 위치
- 차선변경 flag : 차량이 현재 차선변경 중에 있는지 여부
- 회전 flag : 차량이 현재 회전 중에 있는지 여부
- 대기순서 : 차량이 정지선에 대기 중일 때의 순서

2) 차량추종

차량추종행태 분석을 위해서는 GM모형을 적용하였다. GM 모형은 시간 t에서의 후행차량의 반응은 t- Δt에서의 선행차량에 의해서 주어지는 후행차량의 민감도와 자극의 강도에 의존한다는 기본개념으로 개발되었다.<sup>[6]</sup> GM 연구진은 일반적인 구조에서는 같으나 민감도 관점에서는 서로 다른 5개의 모형을 개발하였다. 이중 5번째 모형이 나머지 4개의 모형을 수용하는 하나의 일반화된 모형으로서 다음과 같다.

$$\ddot{x}_{n+1}(t+\Delta t) = \frac{\alpha_{l,m}}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^l} \dot{x}_{n+1}(t+\Delta t)^m$$

$$[ \dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t) ]$$

여기서,  $\ddot{x}_{n+1}(t+\Delta t)$  : t+Δt에서의 n+1 번째 차량의 가속도

- $\dot{x}_n(t)$  : t에서의 n번째 차량의 속도
- $x_n(t)$  : t에서의 n번째 차량의 위치
- l : 거리 민감도 계수(본연구에서는 1을 사용)
- m : 속도 민감도 계수(본연구에서는 1을 사용)
- $\alpha_{l,m}$  : 속도에 대한 민감도 상수값.

여기에서 민감도 상수인  $\alpha_{l,m}$ 는 도로의 여건에

따라 주어지는 값으로서 본 연구에서는 5.2m/sec를 적용하였다.

3) 차선변경

교통류의 특성용 모의실험하는데 있어서 고려해야 할 또 하나의 중요한 행태는 운전자들이 도로를 주행하면서 겪게 되는 다양한 상황에 대한 반응으로 나타나는 차선변경 행태이다. 이러한 문제는 특히 도시내 가로망같이 복잡하고 다양한 운전환경에 있어서는 이들 인자 들간의 상호 연관성 때문에 이들의 관계를 명료하게 모형화하기는 쉽지 않다. 일반적으로 운전자들이 차선변경을 시도하는 경우는 다음과 같다.

- 하류부 교차로에서 회전하고자 할 때
- 대기행렬이 인접차선보다 상대적으로 높을 때
- merge 및 diverge 지점에서
- 특정차선에 사건(주정차 차량, 접촉사고 등) 발생시
- 선행차량이 대형차량인 경우

이중 본 모의실험 모형에서는 앞의 세 가지 경우만을 차선변경의 대상으로 하였으며 매 시간 간격마다 전체 차량에 대해 차선변경 필요성을 분석한다.

차선변경의 필요성이 인지된 차량은 목표차선을 설정하고 차선변경 가능성을 확인하게 되는데, 이때 목표차선이 설정되었으면 목표차선의 각 차량들의 속도를 고려한 허용간격(acceptable gap)을 확인하게 된다. 그 단계별 판단절차는 다음과 같다. 이 과정에서 목표차선의 허용간격이 확실되지 않은 경우에는 허용간격을 기다리면서 계속 원래의 차선을 따라 주행한다. <그림 3-2>는 차선변경시 허용간격의 개념도를 나타낸다.

-1단계 : 차량  $c_i$ 이  $v_i, a_i$ 상태에서 거리 l만큼 가는데 소요되는 시간 t를 구함

$$l = v_i t + \frac{1}{2} a_i t^2 \text{의 관계식에서}$$

$$\begin{cases} t = \frac{v_1 + \sqrt{v_1^2 + 2a_1 l}}{a_1} & (a_1 \neq 0) \\ t = \frac{l}{v_1} & (a_1 = 0) \end{cases}$$

-2단계: t초후의 각 차량의 위치  $d_i$ 를 구함

$$d_1 = \sqrt{l^2 - b^2} + \text{현재 차량의 위치}$$

$d_2, d_3$ 는 동일한 방법으로 1단계에서 각기 구함.

-3단계: IF  $d_2 - c_{l_2} > d_1 + d_{min1}$

THEN  $d_1 - c_{l_1} > d_3 + d_{min3}$

THEN O.K.

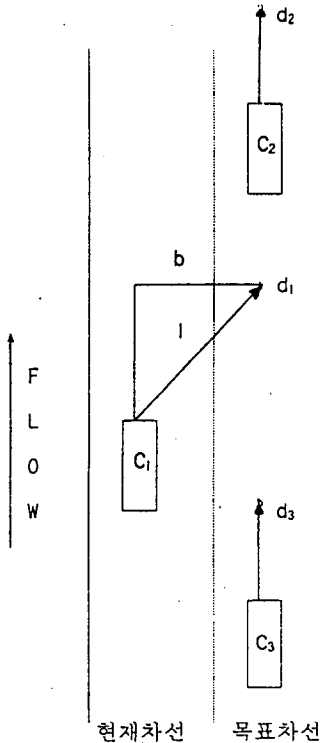
ELSE  $a_1$ 을(최대가속율/10)씩 증가하며 1단계에서 3단계 과정반복

END IF

ELSE  $a_1$ 을(최대가속율/10)씩 감소하며 1단계에서 3단계 과정반복

(이 과정에서  $a_1$ 이 최대가속율 절대값 내에서 만족이 안되면 차선변경은 이루어지지 않는다.)

END IF



$l$  = 차선변경 거리(m)

$t$  = 차량  $c_i$ 이  $v_i, a_i$ 상태에

$l$  만큼 가는데 소요시간

$a_i$  = 차량  $i$ 의 가속도( $m/sec^2$ )

$v_i$  = 차량  $i$ 의 속도( $m/sec$ )

$d_i$  = t초후의 각차량의 앞범퍼 위치

$d_{mini}$  = 차량 $i$ 와 선행차량의 최소차두거리

$c_{li}$  = 차량  $i$ 의 길이

<그림 3-2> 차선변경시 허용간격 개념도

4) 검지기자료 발생 및 1차처리<sup>(4)</sup>

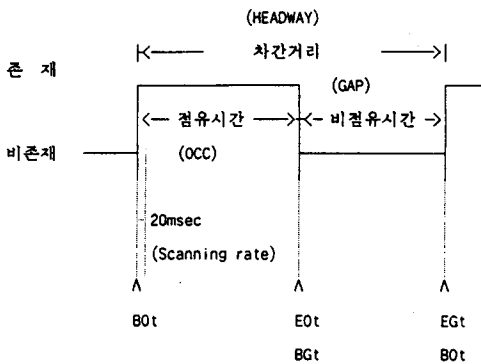
기존 모의실험기와 비교하여 본 모의실험 모형의 주요 장점중의 하나인 real time 신호시간 제어전략 평가를 위해서는 검지기 자료 처리가 필

수적이다. 본 연구에서는 사용자의 입력 카드에서 검지기의 위치 및 크기 그리고 용도를 정의할 수 있도록 하여 다양한 조합의 검지기 자료를 분석할 수 있게 하였다.

<그림 3-3>에서 보이는 바와 같이 실제 검지기로 부터 입력되는 신호는 차량의 존재여부, 즉 존재 시는 high 비존재 시는 low형태인 두가지 신호이다. 검지기자료 1차 처리기는 이를 존재와 비존재의 누적치로 처리하게 된다.

$$\text{점유시간(OCC)} = \text{EOt} - \text{BOt}$$

$$\text{간격(GAP)} = \text{EGt} - \text{BGt}$$



- BOt : 차량 존재 시작시간(Beginning of Occupancy)
- EOt : 차량 존재 종료시간 (End of Occupancy)
- BGt : 차량 비존재 시작시간(Beginng of Gap)
- EGt : 차량 비존재 종료시간(End of Gap)

<그림 3-3> 검지기 자료의 개념도

### 3. 구성내용

#### 1) 운영환경

제안된 모의실험모형은 PC에서 운영할 수 있도록 설계되어 있으며 graphic animation을 지원하는 모의실험모형으로서 개발에 사용된 language는 Borland사의 Turbo C 2.0 Version을 이용했으며 최소한 다음과 같은 환경을 필요로 한다.

- 기본메모리 1M이상의 PC386급 이상
- VGA graphic card 내장

모의실험 모형에서 분석할 수 있는 가로망의 규모는 <표 3-1>에서 보는 바와 같다.

<표 3-1> 개발된 모의실험기 용량

항 목	용 량
링 크 수	80 개
노 드 수	30 개
차 량 대 수 <sup>1)</sup>	2,400 대

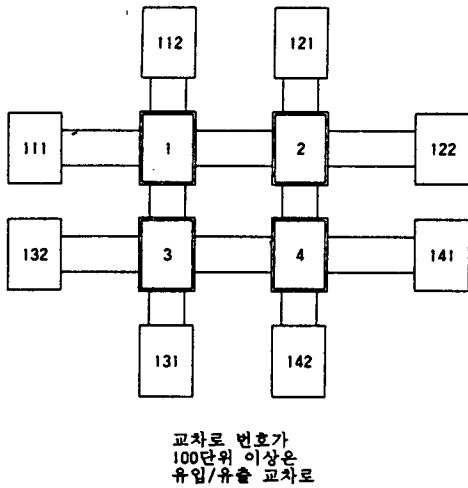
주1) : 여기서의 차량대수는 가로망에 유입되는 교통량이 아니고 분석 가로망내에서 동시에 분석할 수 있는 차량대수이다.

#### 2) Input 체계

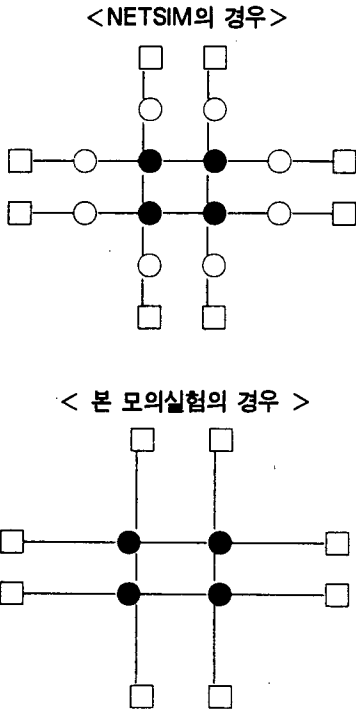
교통류 모의실험 모형이라함은 다양한 변수에 의해 반응하도록 작성되어야 하는데 본 연구에서는 주로 교통운영 측면에서의 분석을 목적으로 다음과 같은 입력 조건에 따라 가로망의 상태를 평가할 수 있도록 개발하였다.

- 회전 교통량, 대형차량 혼입율
- 신호제어변수(주기, 녹색시간비, 연동값)
- 신호현시순서(Dual/Single Ring)
- 신호시간 관리방법(고정 및 TOD, 교통류대응, 실시간 제어)
- 차선수, 포켓길이, 차선용도
- 주행안내(Dynamic Route Guidance)시스템의 영향.

본 모의실험 모형에서 적용한 가로망구조의 예는 <그림 3-4>에서 보는 바와 같이 각 방향별 링크와 유입/유출교차로 그리고 분석교차로로 이루어져 있다. 유입/유출교차로는 차량의 발생 및 유입만을 처리하지만 실제의 신호시간에 의해서 차량을 유입시키기 때문에 실제로 존재하는 교차로이어야 한다. 그림에서 보듯이 결국 4개의 교차로를 분석하기 위해서는 인접한 8개의 인접교차로의 신호시간 자료와 유입교통량이 필요하다.



<그림 3-4> 모의실험 모형의 가로망 구조

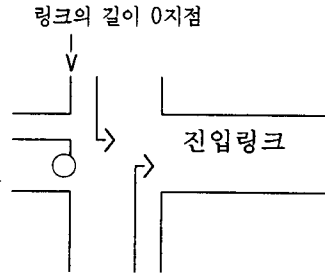


□ : 유입/유출 교차로 ○ : 가상 교차로 ● : 분석 교차로

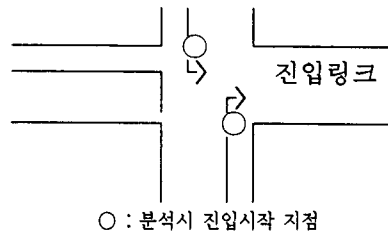
<그림 3-5> NETSIM과의 가로망 구조 비교도

이에 반하여 NETSIM에서는 <그림 3-5>에서 보는 바와 같이 분석교차로 주변에 가상의 교차로(dummy intersection)를 지정하여야 하며 이 주위에 다시 유입.유출 교차로를 지정하여야 한다. NETSIM의 경우 <그림 3-4>와 같은 가로망을 분석하기 위해서는 <그림 3-5>에서 처럼 총16개의 교차로자료가 설계되어야 한다. 이점에 있어 본 모형에서는 유입.유출 교차로를 실제의 교차로 신호시간자료에 의해 분석함으로써 가상교차로를 제거하여 결과적으로 분석 교차로 수를 줄여 컴퓨터 메모리를 적게 차지하는 한편 모의실험이 단순화 되면서도 현실적으로 수행되도록 개선하였다.

<NETSIM의 경우>



<본 모의실험의 경우>



<그림 3-6> 진입 차량의 위치

또한 차량이 하나의 링크에서 새로운 링크로 진입할 때의 차이를 비교해 보면, NETSIM에서는 차량이 하나의 링크를 통과하여 새로운 링크로 진입할 때 <그림 3-6>에서와 같이 회전여



부에 관계없이 이전 링크의 정지선에서부터 차량을 진행시킨다. 따라서 좌회전이나 우회전 차량의 경우 특히 교차로가 넓은 지역에서는 실제 진행하는 거리 및 주행시간과 차이가 있게 된다. 본 모의실험 모형에서는 이러한 불합리한 점을 개선하여 회전차량의 경우에도 실제위치에서 회전을 하는 것으로 개선하였다.

### 3. Simulation 진행과정

#### 1) 난수의 발생

본 모의실험 모형에서 적용한 난수의 발생은 현재 가장 많이 사용되고 있는 TRAF-NETSIM의 Multiplicative Linear Congruential Generator (MLCG)기법을 적용하였다. 난수 종자(random number seed)수에 있어서도 하나만을 사용했을 때의 단점인 하나의 난수를 모든 통계처리에 사용함으로써 모의실험모형에 의해 생성되는 무작위행태(random behavior)가 적절히 반영되지 못함과 통계적 처리들 상호간의 의존성을 배제하기 위해 차량별로 독립적인 난수종자값(random seed)을 할당하였다.

$$Xseed(i) = \text{Mod} [a * Xseed(i-1) + \text{Mod}(Xseed(i-1), k) * k, m]$$

$$Rn(i) = Xseed(i) / p$$

여기서,

a : 임의의 5를 제외한 홀수 상수(사용자 지정)

k : 10,000

m : 10,000,000

p : 100,000,000

Rn : 0 - 1 사이의 정수

#### 2) 차량발생 및 유입

유입부 교차로에서의 차량발생은 매 시간단계(time-step)마다 각 방향별로 지정된 시간당 교통량을 만족시키기 위해 통계적 확률 값에 의하여 발생된다. 발생 시에 차종 또한 주어진 비율에

의해 대.소형으로 무작위로 할당된다.

일반적으로 차량의 도착행태는 도착율과 도착간격으로 묘사되는데, 제안연구에 적용한 차량발생 확률분포는 포아송분포를 따른다는 가정 하에 다음과 같은 절차에 의하여 유입교차로에서 차량을 발생한다. 이렇게 발생된 차량은 유입교차로의 신호시간에 의해 정지 및 통과를 하게 되며, 다음 분석대상 교차로에서는 차량군의 영향, 연동화의 영향 등이 고려된 분석이 이루어지게 된다.

발생된 차량들은 해당 방향별 버퍼에 쌓이게 되며 자신의 통행권이 허용되기를 기다린다. 가로망 유입부 교차로의 회전방향별 대기버퍼에 쌓인 차량들은 신호시간 관리기에 의해서 자신의 통행권이 허용되고 링크 유입부의 공간이 확보되면 주어진 유출율로 분석 가로망에 진입하게 되는데 이때의 차량의 초기속도 및 가.감속도는 차량추종 모형에 의해 결정된다.

유입시 점유차선의 결정은 하류부에서의 회전 목적에 부합되는 차선중 대기행렬이 가장 적은 차선을 할당한다. 그리고 유입부에서의 대기시간은 차량이 분석 가로망내로 진입하지 않은 상태이기 때문에 분석에서 제외되며 대기 차량 수만이 관리된다.

NETSIM과 비교해 볼 때 차량 발생방법은 서로 유사하나 유입 교차로에서 차량을 분석 가로망내로 진입시키는 과정은 다르다. NETSIM에서는 유입교차로의 신호시간에 관계없이 발생된 차량을 통계적 차두시간분포에 의하여 가로망으로 진입시킨다. 반면에 제안 모의실험모형에서는 유입교차로에서의 신호시간에 따라 진입여부를 결정하게 된다. NETSIM의 방법은 분석 가로망에 인접한 유입교차로의 신호조건과 관계없이 주어진 차두시간 분포를 이용하기 때문에 유입교차로의 교통상황을 분석 가로망에 반영시키는데 어려움이 있다.

#### 3) 차량진행

유입교차로에서 가로망으로 진입된 차량은 주어진 차선을 따라 차량추종모형에 의하여 링크상을 주행하게 되며 각 차선에서의 선두차량은 링크별로 주어진 제한속도 내에서 희망속도에 도달하기 위한 노력을 계속한다. 이때 하류 교차로의 신호현시가 해당 차량의 회전에 대한 통행권을 허용하지 않는 경우에는 산정된 감속율로 정지선에 도달하게 된다. 신호현시가 녹색에서 황색신호로 바뀌는 경우에는 현재의 속도로부터 주어진 최대 감속율로 정지할 수 있는 경우에는 정지선에 정지하고 그렇지 못한 경우에는 그대로 교차로를 통과하게 된다. 후행차량은 앞차와의 최소 차두거리(space headway)을 만족하는 가속율로 주행을 하면서 인접차선의 효율이 좋은 경우에 차선변경을 시도하게 된다.

정지선에 대기중인 차량군은 해당 이동류에 대한 통행권이 허용되면 첫 번째 차량부터 보통 5-6번째 차량까지는 출발손실시간을 겪게 되며 이후 차량들은 평균 차두시간을 가지고 정지선을 통과하게 된다. 제안모의실험모형에서는 사용자가 출발손실시간 분포를 지정할 수 있게 하였으며 사용자가 별도로 지정하지 않은 경우에는 <

표 3-2>에 보이는 것처럼 한국도로용량편람<sup>[5]</sup>에서 조사된 값을 기정값(default value)으로 적용 하였다.

<표 3-2> 출발 손실시간 분포

차량순서	1	2	3	4	5	6
차두시간	2.35	2.10	2.00	1.90	1.82	1.63
손실시간	0.72	0.47	0.37	0.27	0.19	0.00

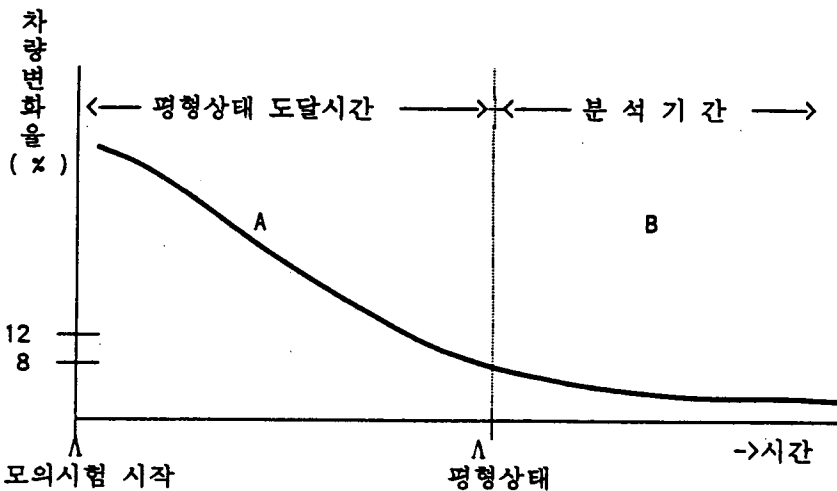
평균 차두시간 : 1.63(초)

4) 평형상태

교통류 모의시험에서의 평형상태(equilibrium state)라 함은 교통계획분야에서의 개념과는 다른 의미로서, 분석가로망내의 유입·유출 교차로들에서의 총 유입교통량과 총 유출교통량이 비슷한 분포를 이루는 시점을 의미한다.

즉,  $\sum In \cong \sum Out$ 인 상태를 평형상태에 도달했다고 간주한다.

$$\text{차량변화율(\%)} = \frac{|\sum In - \sum Out|}{\sum In} \times 100$$



<그림 3-7> 평형상태 과정도

<그림 3-7>에서와 같이 모의실험을 시작하

는 시점에서는 분석 가로망 내에 차량의 존재가

없는 상태에서 차량이 발생·유입되기 시작하므로 어느 시점까지는 분석 가로망내부에 차량의 유입만 있고 차량의 유출은 유입에 비해 상대적으로 적은 상태(A 상태)이다. 따라서 평형상태는 이루어지지 않으며, 이러한 상황이 시간의 경과에 따라서 평형상태(B 상태)로의 전이가 이루어지게 된다. 평형상태까지의 소요시간은 분석 가로망의 구조, 교통류 상황변수 그리고 신호제어변수 등에 따라 다르다.

#### 4. Output 체계

모의실험에 있어서 효과적도는 분석가로망의 효율성을 평가하는데 기준이 되는 중요한 도구로서 다음과 같은 항목을 효과적으로 선정하였으며 효과적도 외에 시공간도와 같은 참고 자료도 제공한다.

- 평균 정지지체시간<sup>1)</sup>: 각 링크별 이동류별 차량의 평균지체시간으로서 본 연구에서는 차량이 정지선에서 신호대기를 위해 정지하고 있는 경우만을 정지시간으로 고려함.
- 평균 여행시간: 각 링크별 이동류별 차량의 평균여행시간으로서 링크의 길이를 차량이 지체시간을 포함하여 하나의 링크구간을 주행하는데 소요된 시간으로 나눈 값.
- 평균대기행렬: 각 링크별 이동류별로 정지선에 대기중인 차량을 이동류별 차선수로 나누어 구함.

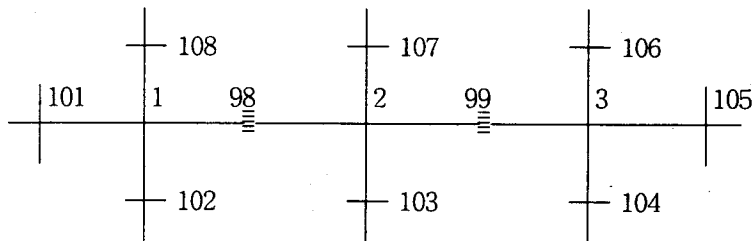
- 통과 교통량: 분석기간내에 각 링크별 이동류별로 정지선을 통과한 누적차량의 수
- O/D 표: 분석기간내에 발생되어 유입교차로를 origin으로 하고 유출교차로를 destination으로 했을 때의 O/D 교통량 매트릭스
- O/D 여행시간표: 분석기간내에 발생되어 유입교차로를 origin으로 하고 유출교차로를 destination으로 했을 때의 O/D별 여행시간표
- 시공간도: 매 시간간격(X축)에 대한 각차량의 위치(Y축)를 차선별로 보여주는 2차원 그래프로 시간경과에 따른 차량의 궤적을 보여줌
- 잔류 차량통계: 분석기간 동안에 유입 교차로에서 발생된 차량중 진입한 차량과 대기중인 차량의 통계를 보여줌.

### IV. 적용 및 검증

#### 1. 모형의 사례적용

##### 1) 실험환경

본 분석을 위해 논현로중 횡단보도 2개를 포함한 3개의 분석 교차로와 교통류 유입·유출을 위한 인접교차로 8개로 이루어진 구간을 현장 모의 실험 구간으로 선정하였다. <그림 4-1>는 분석구간의 가로망을 보이며 <표 4-1>은 교차로 번호에 대한 교차로 명을 나타낸다.



<그림 4-1> 분석 대상 가로망도

1) 정지지체라 함은 차량이 정지선에서 신호대기를 위해 완전히 정지(속도=0)한 경우와 정지에 가까운 서행상태에서의 지체를 포함하는데, 후자의 경우 주행속도가 얼마 이하인 경우를 정지지체로 볼 것인가에 따라 다른 결과를 보이게 됨. NETSIM의 경우, 속도가 3 feet/sec(약 1km/hour)이하인 차량은 정지한 것으로 간주하나 이에 대한 구체적인 근거는 없음.

<표 4-1> 분석 교차로명

교차로 번호	교차로 명	교차로 번호	교차로 명
1	안 세 병 원	104	제 일 생 명
2	논 현 천 주 교	105	역 삼 역
3	차 병 원	106	경 북 아 파 트
101	압 구 정 역	107	관 세 청
102	신 사 역	108	도 산 공 원
103	영 동 사 거 리	98,99	횡 단 보 도

주) 100단위 이상의 교차로 번호는 유입·유출 교차로를 의미

2) 자료조사 및 분석방법

본 평가를 위해서 관측자료로는 분석대상 가로망의 여행시간 및 지체시간을 시험차량 주행방법을 적용하여 4번씩 반복하여 수집하였으며, 제안된 모의실험 모형과 NETSIM 모형을 이용하여 실험대상 가로망의 교통상황을 오전 08:00부터 08:15분까지 각 15분씩 10차체의 반복수행을 통하여 각 링크별 여행속도와 정지지체의 평균치를 도출했다.

또한, NETSIM과 제안 모의실험 모형을 이용하여 특정교차로(논현천주교)의 offset을 0% 부터 90%까지 10%씩 변화시켜가며 안세병원에서 논현천주교에 이르는 링크구간의 효과척도가 가장 좋은 결과를 나타내는 적정 offset을 도출했다.

2. 분석결과 및 평가

1) 평가방법

모의실험 분석결과를 평가하기 위한 방법으로 통계적 검정이 사용될 수 있다. 그러나 대부분의 모든 현세계 시스템들과 모의실험들의 결과는 비안정적(nonstationary)이고 자기상관적(autocorrelated)이기 때문에 모의실험이 현상을 정확히 나타내는지 판단하기에는 고전적인 통계 검정방법인 t검정법, chi 제곱 검정법 등은 적용

상 한계가 있다<sup>[1]</sup>. 따라서 본 모의실험의 대상이 가상의 세계가 아닐 뿐만 아니라 현장관측치, 혹은 기존의 모형결과치와 비교 또는 전문가의 판단에 의한 평가가 충분히 가능하므로 본 적합성 평가를 위해서는 모의실험 평가에 일반적으로 많이 이용되는 검사방법(Inspection Approach)을 적용하여 평가하고자 한다.

2) 비교분석결과

<그림 4-2>와 <그림 4-3>에서 보이는 바와 같이 NETSIM과 제안된 모의실험 모형에서 분석된 효과척도를 보면 여행속도와 정지지체에 있어서 링크구간 2 -> 1 과 3 -> 2 구간을 제외하고는 현장자료와 두 모형의 링크별 여행속도가 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

여행속도의 경우, <표 4-3>을 보면 관측치와 제안 모의실험 모형의 결과에 있어서 오차 합이 58.4로서 NETSIM의 83.5보다 오히려 낮게 나타났으나 정지지체의 경우는 <표 4-4>에서 보이는 바와 같이 제안 모의실험 모형이 329로 NETSIM의 281보다 높게 나타났다.

그리고 모의실험의 결과가 <그림 4-4>와 <그림 4-5>에서 처럼 관측치와 NETSIM모형에 비하여 상대적으로 좋게 평가(속도는 과대, 지체는 과소)된 것은 본연구에서는 측면마찰에 의한 영향을 고려하지 않은점 그리고 표<4-2

>에서 보는 바와 같이 정지지체 산정방법의 차이"에 기인하는 것으로 판단된다.

<표 4-2> 정지지체 산정방법의 차이

구 분	정지지체 조건	정지지체 고려 대상
현장조사	속도 0.0kph 일 때	- 신호대기 - 측면마찰에 의한 지체
NETSIM	속도 3fps (약 3.3kph)이하	- 신호대기 - 측면마찰에 의한 지체
본 모의실험	속도 0.0km 일 때	- 신호대기

적정 offset의 분석에 있어서는 <그림 4-6>에서 보이는 것처럼 안세병원에서 논현천주교 링크구간에 대한 논현천주교의 최적값이 본 모의실험과 NETSIM에서 공히 70%로 분석되어 일치된 결과를 보였다.

<그림 4-7>은 제안 모의실험 모형에서 작성한 분석대상가로망의 시공간도이다. 시공간도는 X축을 시간 축으로 하고 Y축을 거리 축으로

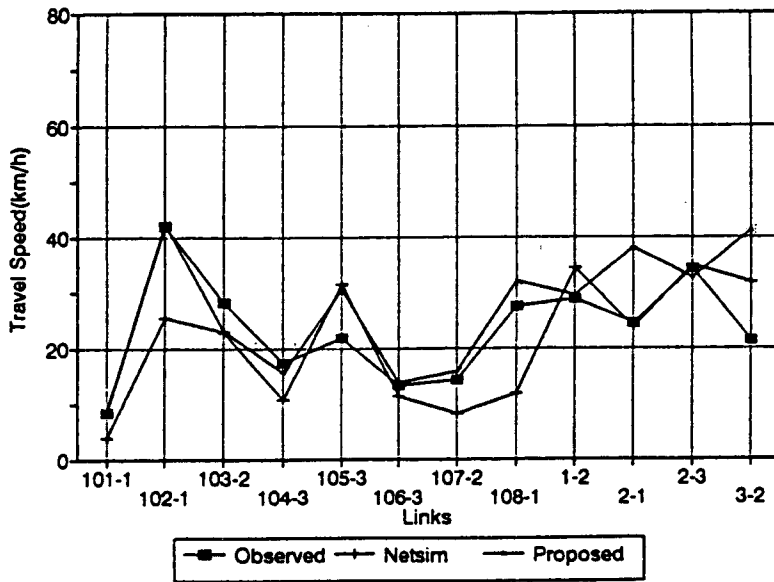
하여 시간의 변화에 따라 차량의 궤적을 확인할 수 있는 유용한 도구이다. 앞에서 분석된 결과를 보면 압구정역에서 안세병원에 이르는 구간(101 - 1 링크)의 정지지체가 차량당 평균 238초로서 가장 정체가 심한 것으로 분석되었는데, 이 그림에서도 안세병원(1번 교차로)에서 많은 차량이 밀려 있는 것을 확인할 수 있다.

<표 4-3> 여행속도 분석결과

(단위: km/h)

링 크	관측치	NETSIM		본 모형	
		결과치	오 차	결과치	오 차
101-1	8.3	3.9	4.4	8.7	0.38
102-2	42.0	25.5	16.5	42.3	0.27
103-3	28.1	23.0	5.1	23.1	5.0
104-3	17.4	10.7	6.7	15.7	1.7
105-3	21.8	31.5	9.7	30.6	8.8
106-3	13.2	11.4	1.8	13.7	0.5
107-2	14.2	8.2	6.0	15.8	1.6
108-1	27.5	11.8	15.7	32.0	4.5
1-2	28.8	34.4	5.6	29.4	0.6
2-1	24.4	23.7	0.8	38.0	13.5
2-3	34.2	34.9	0.7	32.6	1.6
3-2	21.3	31.8	10.5	41.2	19.9
	평 균	평 균	계	평 균	계
	23.4	20.9	83.50	26.9	58.4

1) 정지지체는 차량의 속도가 몇 km/h 미만인 경우를 정지한 것으로 볼 것인가에 따라 값이 달라진다. NETSIM의 경우는 약 3.3 km/h를 기준으로 하고 있으나 현재까지는 이에 대한 정확한 기준이 제시된 바 없다. 본 모형에서는 0.0km/h를 정지 지체로 간주하였다.

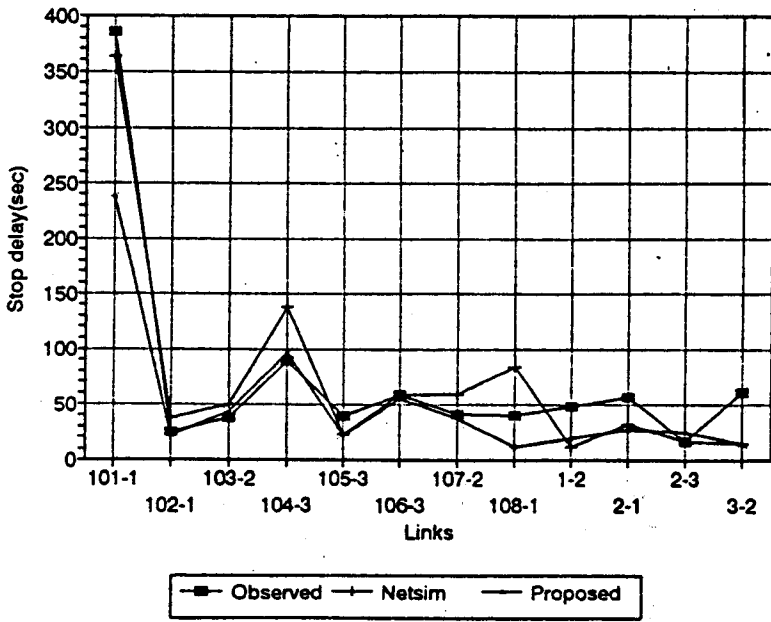


<그림 4-2> 링크별 여행속도

<표 4-4> 정지지체 분석결과

(단위 : sec/veh)

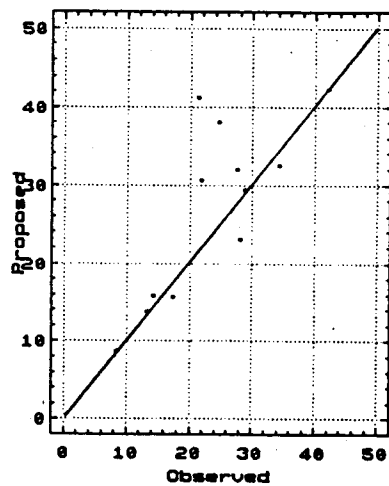
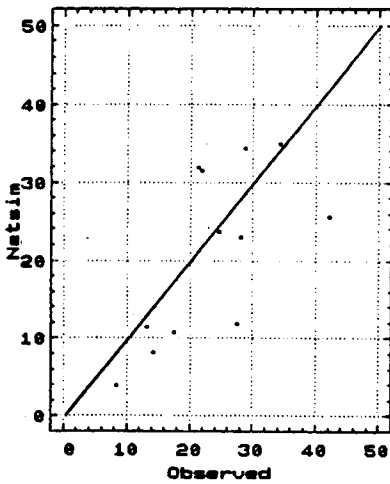
링 크	관측치	NETSIM		본 모형	
		결과치	오 차	결과치	오 차
101-1	385	363.0	22.0	238.0	147.0
102-2	25	37.6	12.6	21.8	3.2
103-3	38	49.4	11.4	43.0	5.0
104-3	89	137.4	48.4	96.4	7.4
105-3	39	22.4	16.6	21.5	17.5
106-3	58	58.4	0.4	55.4	2.9
107-2	41	59.4	18.4	36.6	4.4
108-1	40	83.7	43.7	11.8	28.2
1-2	48	11.4	36.6	19.6	28.4
2-1	57	32.0	25.0	27.0	30.0
2-3	16	16.0	0.0	25.3	9.3
3-2	61	14.9	46.1	15.0	46.0
	평 균	평 균	계	평 균	계
	74.8	73.8	281.20	50.9	329.05



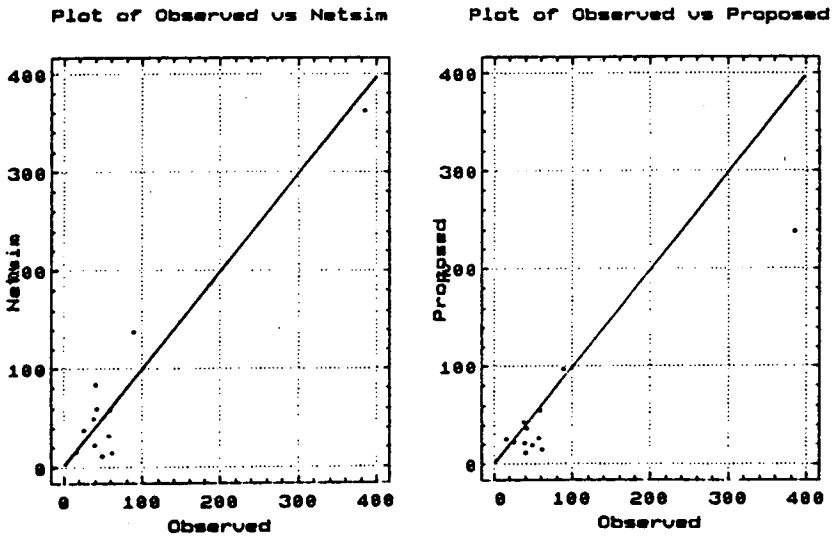
<그림 4-3> 링크별 정지지체

Plot of Observed vs Netsim

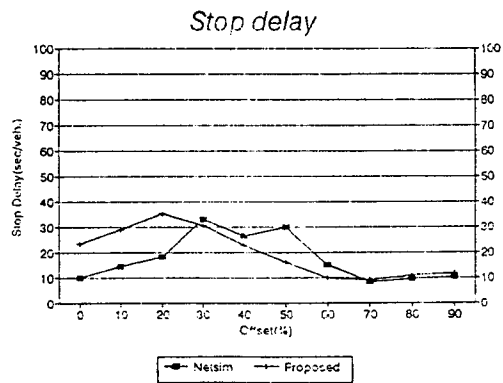
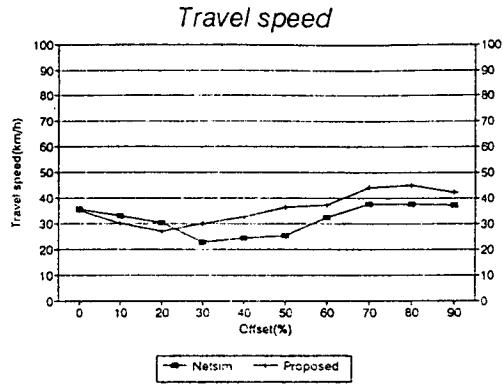
Plot of Observed vs Proposed



<그림 4-4> 여행속도 분포

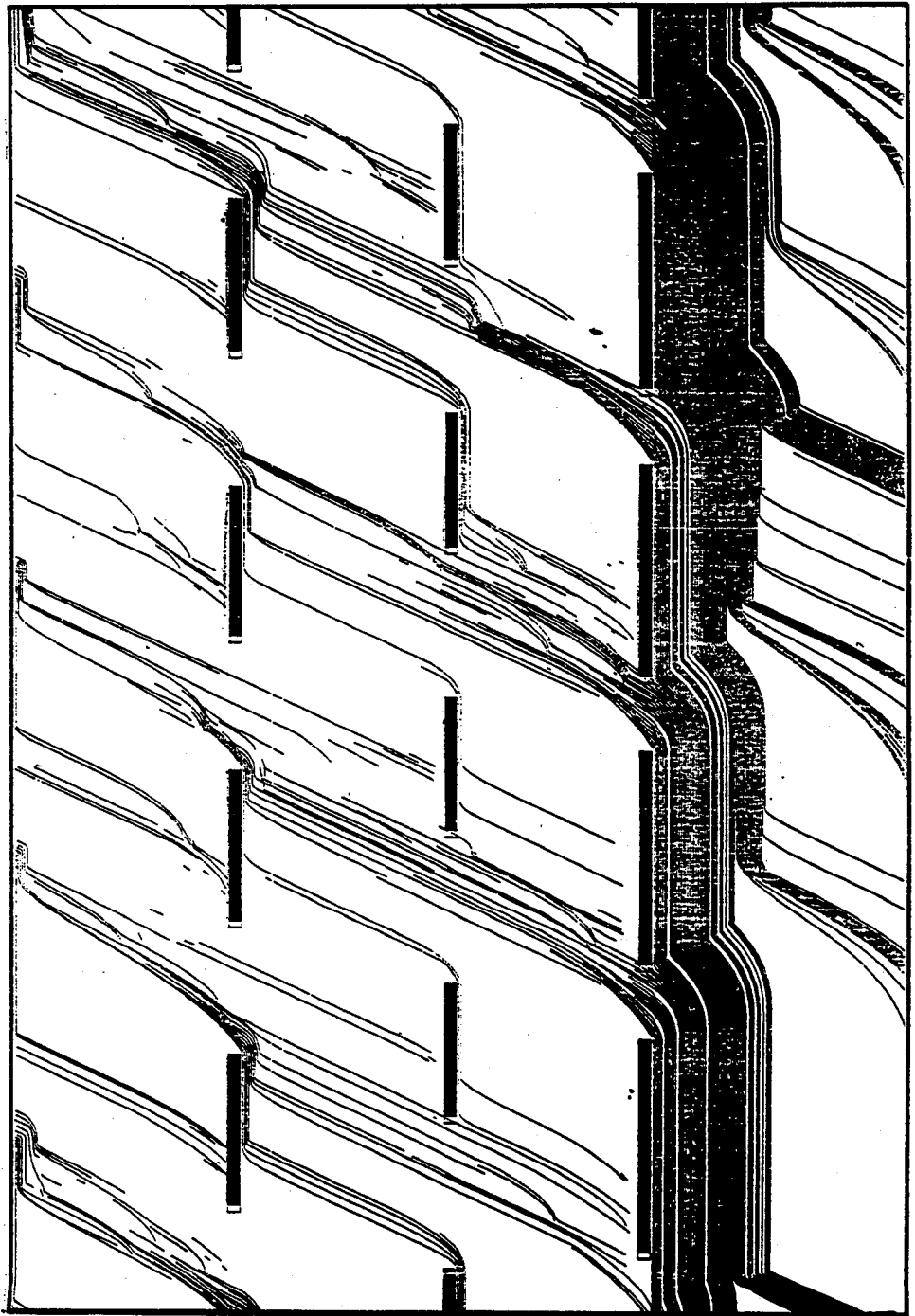


<그림 4-5> 정지지체 분포



<그림 4-6> 적정 Offset 분석결과





<그림 4-7> 분석대상구간 시공간도

## V. 결론

본 모의실험모형의 주요 특징은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- Graphic Animation 기능을 이용하여 교통류 흐름을 쉽게 파악할 수 있도록 하였다.
- 가로망에 유입차량을 차두시간 확률분포에 의한 방법이 아니고 실제의 신호현시에 의하여 유입시킴으로써 실제 교차로의 교통흐름을 분석가로망에 현실적으로 반영하였다.
- 신호현시체계에 있어서 단일링(single-ring)과 복합링(dual-ring)을 모두 고려하여 다양한 신호현시계획을 평가할 수 있다.
- 신신호제어체계, 주행안내체계 등 실시간 교통류 운영체계에 분석이 가능하다.

본 모의실험모형의 적용범위로는 차선용도나 좌회전 포켓길이, 신호시간계획이나 신호현시계획의 변경에 따른 대안평가 그리고 새로운 신호제어기법이나 첨단교통체계의 도입시 효율성 평가 등에 활용될 수 있을 것이다. 또한 기능적인 측면에서는 타 모의실험모형에 없는 기능(검지기 자료 및 시공간도 생성 등)도 일부 추가되기도 하였으나 전반적으로는 기본적인 변수만을 고려한 바, 다음과 같은 세부적인 기능은 추후 더욱 연구·보완되어야 할 것이다.

- 운전자 행태에 의한 영향 : 모든 운전자의 행태는 동일한 것으로 간주하였는데 이를 더욱 다양한 형태로 분류하여 분석하는 기초연구가 요구된다.
- 측면마찰에 의한 지체와 접근지체 고려 : 본 모의실험 모형에서는 정지선에 신호대기중인 정지지체만을 고려하였는데 측면마찰에 의한 지체와 접근지체등을 고려할 수 있도록 개선되어야 한다. 특히 국내의 도시가로망 여건에서는 노선버스에 의한 영향이 분석 가로망의 교통류 흐름에 중요한 요소로 작용하는 경우가 많을 것으로 판단된다.

- 차량 성능에 의한 영향 : 차종은 소형과 대형으로만 분류하여 같은 차종에 대해서는 동일한가.감속율을 적용하였는데 이를 사용자의 입력분포에 맞게 적용해야 할 것이다.
- 각종 사건에 의한 영향 : 주행차선중에 장애물(고장차량이나 도로공사 등) 그리고 노상주차에 의한 교통류 방해 및 간섭현상을 모의실험할 수 있는 연구가 추후 요구된다.
- 효과척도 보강 : 제안 연구에서는 평균 여행시간, 평균 정지지체, 평균 대기행렬 등을 주요 효과척도로 채택하였는데 이외에 환경측면에서의 유해가스 배출 정도 및 연료소모 등의 사항을 보완해야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

1. 이영해/백두권, 시스템 시뮬레이션, 1991.
2. 도로교통안전협회, 교통신호제어시스템 기술개발, 1992.
3. 교통개발연구원, 교통신호제어시스템 기술개발, 1992.
4. 교통개발연구원, 교통신호제어시스템 기술개발, 시뮬레이터 개발보고서, 1993.
5. 건설부, 도로용량편람, 1992.
6. P.G. Gipps, "A Model for the Structure of Lane-Changing Decisions", CSIRO Division of Building Research, Melbourne, Australia, June 1985.
7. McTrans, TRAF-NETSIM User's Manual, Center for Microcomputers in Transportation, Univ. of Florida, November 1989.
8. Adolf D. May, Traffic Flow Fundamentals, Englewood Cliffs, New Jersey, 1990.
9. Tranavat Junchaya, Gang-Leng Chang and Alberto Santiago, "Real-Time Network Traffic Simulation Methodology

- with a Massively Parallel Computing Architecture", Transportation Research Board 71th Annual Meeting, Washington D.C., Jan. 1992.
10. Shinya Kikuchi and Partha Chakroborty, "A Car-Following Model Based on Fuzzy Inference System", Transportation Research Board 71th Annual Meeting, Washington D.C., Jan. 1992.
  11. Fukuyama Consultants International Co., Ltd., Application of AI technologies to Traffic Control Phase-2, Local Controller Definition and Specification, Final Report Volume 4 Linear Network Traffic Control System Simulator, Japan, March 1990.
  12. Ajay K. Rathi, and Alberto J. Santiago, Urban Network Traffic Simulation: TRAF-NETSIM Program
  13. R. F. Benekohal and Joseph Treiterer, "CARSIM : Car-Following Model for Simulation of Traffic in Normal and Stop-and-Go Conditions", Transportation Research Record 1194.
  14. Daniel L. Gerlough and Matthew J. Huber, Traffic Flow Theory, TRB special report 165, 1975.