한국시뮬레이션학회 '99춘계학술대회 논문집 1999.4.17 동의대학교

이산 사건 형식론을 이용한 거시적 및 미시적 교통류 시뮬레이션*

Macroscopic and Microscopic Traffic Simulation Using the Discrete Event System Formalism

이종근*,이장세*,임예환*,김병종**,지승도*
*한국항공대학교 컴퓨터공학과
**한국항공대학교 항공교통학과
Tel: 02-3158-4866 Fax: 02-3158-6748
E-Mail : leejk@mail.hangkong.ac.kr

Jong-Keun Lee, Jang-Se Lee, Ye-hwan Lim, Byung-Jong Kim, Sung-Do Chi
Department of Computer Engineering
Hangkong University, Seoul, KOREA

요 약

본 연구는 Zeigler가 제안한 이산 사건 시스템 형식론(DEVS: Discrete Event System Specification)을 이용한 거시적 및 미시적 교통류 시뮬레이션 방법론의 개발을 주 목적으로 한다. 도로 교통망의 모델링 방법은 미시적(microscopic)방법과 거시적(macroscopic)방법으로 분류된다. 이러한 모델링 방법들은 그 목적에 따라 각기 표현되어 제각기 사용되어 왔으나, 시스템 이론적으로 이들은 독립적 모델이 아니며 오히려 이들은 서로 동질적 추상화 관계에 있어서, 통합 모델링 환경의 구축시 미시적 모델들로부터 추상화에 의한 거시적 모델의 자동생성 등 설계상의 효율뿐 아니라 모델간의 일관성을 통한 모델 유효성을 보장할 수 있는 장점이 제공될 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 서로 다른 표현 방법(즉, 이산시간 형식론과 이산사건 형식론)간의 통합 표현을 기반으로 양자간의 추상화 관계를 도출하고, 이를 이용한 모델 추상화를 통해 거시적 및 미시적 교통류 모델간의 계층관계를 도출함으로써 거시적 및 미시적 교통류 모델간의 계층 구조적 시뮬레이션을 달성할 수 있는 교통류 시뮬레이션 방법론을 제안한다. 시스템 이론적 접근을 토대로 접근한 통합 교통류 시뮬레이션 환경은 미국 Berkeley 대학 교통 연구소에서 개발한 SHIFT 등과 같은 최첨단 교통류 시뮬레이션 도구에 비하여 SES/MB를 기반으로 시스템 이론적이며 소프트웨어공학적인 접근을 통하여, 1) 기존 제어 방식의 검증 및 신뢰도 분석, 2) 각종 사건, 사고의 시간별 파급효과 분석, 3) 도로건설 계획안에 대한 타당성 검토, 4) 운전자 및 관리자를 위한 예측된 교통정보 등을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

I. 서론

교통시스템을 모사하는 시뮬레이션 시스템들은 1970년대부터 진행되고 있으나, 빠르게 진전되는 교통류 분석 기술 및 기법을 모델의 틀내에 수용하지 못하고 있는 실정이다. 국내의 경우, 현재까지 상용화가 가능한 수준의 모의실험 모형은 개발되어 있지 않다. 다만, 최근 서울시 신신호 시스템의 신호제어기법을 평가할 수 있는 모의실험 모형이 1995년 『도시가로망 분석을 위한 미시적 모의실험기의 개발』 연구[10,11]에서 실험적으로 개발되었다. 그러나 전반적으로 기초적인 변수만을 고려한 초보적인 단계의 모형이라 할 수 있다. 또한, 한국건설기술연구원의 『한국형 모의실험기 개발에 관한 연구』는 새로운 모의실험 모형의 개발이라기 보다는 기존의 외국모형들에 대한 검토를 국내 활용을 위한 모수 정산에 중점을 두고 있다. 국외에서 개발된 모의실험모형 중 대표적인 것으로는 지방부 2차선도로의 운영 분석을 위한 TWOPAS(미국, 1986), 고속도로 유고감지 및 관리제어를 위한 FRESIM(미국, 1990), 도시부 교차로 신호 운영 분석을 위한 TRAF-NETSIM(미국, 1989), 교차로의 신호최적화 및 과포화 상태의 교통류 분석을 위한 SATURN(영국, 1980), CONTRAM(영국, 1986), INTEG-RATION(캐나다, 1988) 등이 대표적이다. 그러나, 이들 모형들은 현재 전세계적으로 가장 큰 연구의 대상이 되

* 본 연구는 과학기술부 특정연구개발과제인 지능형 교통 시스템(ITS) 핵심 기반 기술 개발 사업중 "시뮬레이션 시스템 아키텍처 및 응용 시스템 개발"에 관한 연구로 수행됨

고 있는 첨단교통체계(ITS)의 개별 기능들을 평가하고, 기대되는 효과를 종합적으로 분석하는데 사용하기에는 부적합하다는데 인식을 같이 하고 있다. 따라서, 최근 각 나라에서는 기존의 모형에서 사용되지 않은 새로운 개념의 기법들을 도입하여 ITS의 교통관리·운영 전략의 수립 및 평가를 위한 실험적 단계의 모의실험 모형들을 계속적으로 개발하고 있다. 하지만, 이들 모형들이 지능적인 교통류 시뮬레이션 시스템으로 효과적으로 사용되고, 상용화되기 위해서는 오랜 기간의 검증과정이 필요하다[11].

본 논문에서는 기존의 모델링 방법들이 그 목적에 따라 거시적(macroscopic) 및 미시적(microscopic) 모델링 방법으로 각기 표현되어 제각기 사용되어 왔으나, 시스템 이론적으로 이들은 독립적 모델이 아니며 오히려 이들은 서로 동질적 추상화 관계에 있어서, 통합 모델링 환경의 구축시 미시적 모델들로부터 추상화에 의한 거시적 모델의 자동생성 등 설계상의 효율뿐 아니라 모델간의 일관성을 통한 모델 유효성을 보장할 수 있다는 장점이 제공될 수 있음을 보인다. 따라서, 서로 다른 표현 방법(즉, 이산시간 형식론과 이산사건 형식론)간의 통합 표현을 기반으로 양자간의 추상화 관계를 도출하고, 이를 이용한 모델 추상화를 통해 거시적 및 미시적 교통류 모델간의 계층관계를 도출함으로써 거시적 및 미시적 교통류 모델간의 계층 구조적 시뮬레이션을 달성할 수 있는 교통류 시뮬레이션 방법론을 제안한다. 또한 제안된 방법론이 기존의 최첨단 교통류 시뮬레이션 도구에 비하여 SES/MB를 기반으로 시스템 이론적이며 소프트웨어공학적인 접근을 통하여, 1) 기존제어 방식의 검증 및 신뢰도 분석, 2) 각종 사건, 사고의 시간별 파급효과 분석, 3) 도로건설 계획안에 대한 타당성 검토, 4) 운전자 및 관리자를 위한 예측된 교통정보 등에 적합한 거시적 및 미시적 교통류 시뮬레이션 방법론임을 시뮬레이션 실험을 통하여 검증할 것이다.

본 논문의 순서는 2장에서 SES/MB를 이용한 교통류 시뮬레이션 접근 방법론을 설명하고 3장에서 계층구조적 교통류 모델링에 대하여 제안하고, 4장에서 시뮬레이션 실험을 통하여 제안된 방법론을 검증하고 결론을 맺는다.

II. SES/MB를 이용한 교통류 시뮬레이션 접근 방법론

본 연구는 그림1과 같이 객체지향적 소프트웨어 환경과 SES/MB 프레임워크를 기반으로 미시적 및 거시적 교통류 모델들을 용이하고 유연하게 수용할 수 있는 계층구조적 시뮬레이션 시스템으로 접근한다.

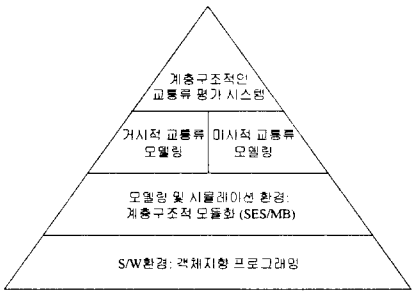


그림1. 교통류 시뮬레이션 시스템의 접근방법

2.1 SES/MB 프레임워크 개요

SES/MB는 Zeigler에 의해 처음 제안된 개념으로 기존의 동역학적 방법론과 AI의 기호적 방법론을 체계적으로 결합시킨 환경을 제공한다. SES/MB는 System Entity Structure와 Model Base의 두 구성원으로 이루어지며, SES는 시스템의 구조적 특성을 나타내는 것으로 선언적 성격을 가지며 구성관계, 구성원의 종류, 구성원들의 결합구조, 그리고 제약조건등의 구조적 지식을 표현할 수 있는 수단을 제공한다. MB는 시스템의 행위적 특성을 나타내는 것으로서 절차적 성격을 가지며 동역학적이고 상징적으로 행위를 표현할 수 있는 수단을 제공하는 모델들로 구성된다.[1,4]

이산 사건 모델링을 위한 대표적인 형식론인 DEVS (Discrete Event System Specification)모델은 연속적인 시간상에서 이산적으로 발생하는 사건들에 대하여 시스템의 행위를 측정하는 것으로서 다음과 같은 형식론에 의해 모델을 표현한다.[1,4]

$$M = < X, Y, S, ta, \delta_{ext}, \delta_{int}, \lambda >$$

여기서, 3개의 집합과 4개의 함수로 구성된 7개의 구성요소는 입력집합 X, 출력집합 Y, 상태집합 S, 시간진행함수 ta, 외부상태전이함수 δ_{ext}, 내부상태전이함수 δ_{int}, 출력함수 λ로 이루어진다[1,4].

2.2 SES/MB를 이용한 교통류 모델링 방법론

본 논문에서 접근하고자하는 궁극적인 시뮬레이션 방법론의 개념도는 그림2와 같다. 그림에서 1단계는 각 도시/도로별 제약조건과 요구사항 등을 입력받아 시뮬레이션대상 및 초기조건을 부여하는 단계이며, 2단계는 이미 라이브러리화되어 있거나 또는 시간대별로 변하거나 또는 새로이 구축하고자 하는 각종 데이터 및 모델들을 검색하거나 생성시키는 단계로서, ① 도시 또는 구역별 도로망 구조를 나타내는 구조적 모델베이스, ② 도로(link) 또는 교차로(node) 등의 동역학을 표현한 동역학 모델베이스, ③ 주어진 도로망 이외에 교통류에 영향을 미칠 수 있는 환경적 요소들의 동역학 모델베이스 (예를들면, 도로공사 계획, 차량사고, 등), ④ 차량별 동역학 모델베

이스, ⑤ 시간대별로 갱신되는 교통류 데이터베이스 등으로 구성될 수 있다. 이러한 데이터 그리고 구조적 및 동역학 모델들을 합성시킴에 의해 3단계에서의 통합된 시뮬레이션 모델이 생성되어 시뮬레이션이 수행된다. 여기서, 사건사고와 같은 교통환경의 동적 변화, 차량별 운전자의 동적 진로 변화, 실시간 모니터링 정보의 갱신, 신호체계의 변화, 그리고 차량별 정보 제공에 의한 차량 움직임의 변화 등은 그림에서와 같이 시뮬레이션 진행 중에도 즉시 반영될 수 있도록 처리될 수 있다. 4단계에서는 시뮬레이션 수행 결과에 대한 통계 자료를 도표나 테이블 등 다양한 방법을 통하여 제공하며, 이러한 정보는 5단계의 응용 시스템 개발을 통하여 효과적으로 활용될 수 있다. 그림3은 교통체계 전반에 대한 객체지향 구조(SES)를 도식화하는데, 전체 교통체계는 크게 교통관리 시스템들, 교통망, 그리고 그 위를 점유하는 차량들 등 세 요소로 나눌 수 있다. 먼저, 교통관리 시스템 하나를 살펴보면 검지 시스템, 신호 시스템, 그리고 교통관리 센터 등 세 종류로 볼 수 있다. 교통망은 여러 개의 노드와 링크로 구성되는데, 그림3에서와 같이 다양한 종류로 구분될 수 있다. 차량 각각은 다시 차체와 운전자로 구성되며, 관점에 따라 다양한 종류로 상세화될 수 있다. 그림에서 각 엔티티에 속한 속성(~)들은 각 객체가 갖는 공통된 특징적 데이터를 의미하며, 이를 통하여 시뮬레이션 파라메터 변수 및 값이 사용될 수 있다. 이와 같이 구축된 SES에 pruning과정을 적용하여 얻은 하나

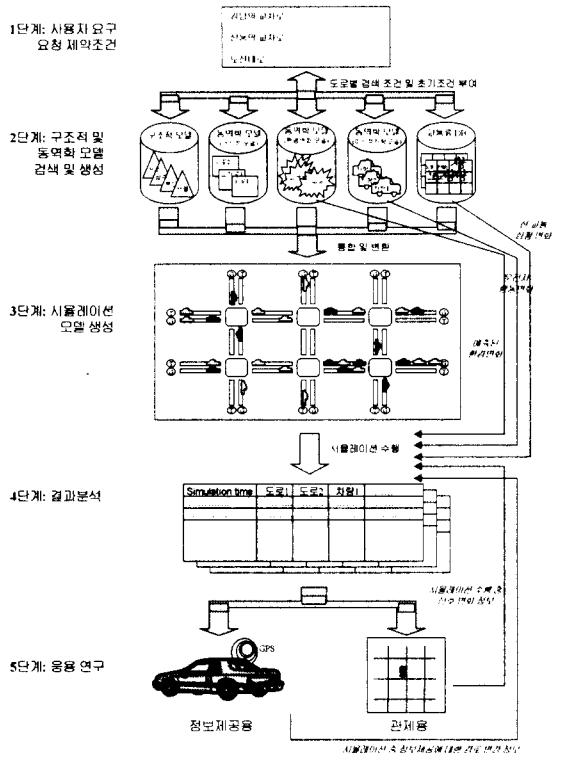


그림2. 교통류 시뮬레이션 방법론

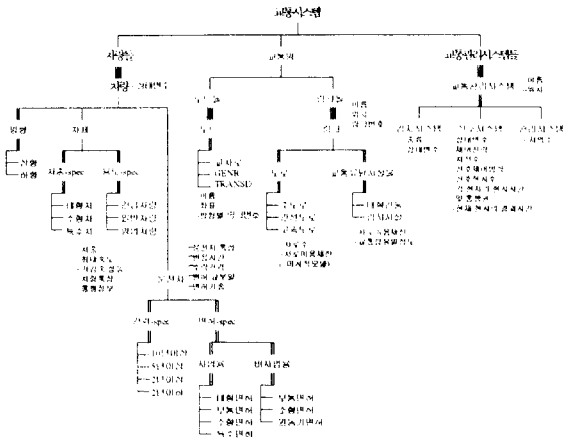


그림3. SES를 이용한 교통류의 구조적 표현

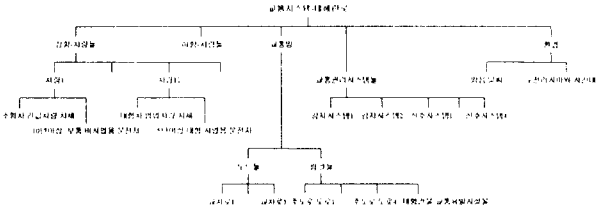


그림4. PES의 예

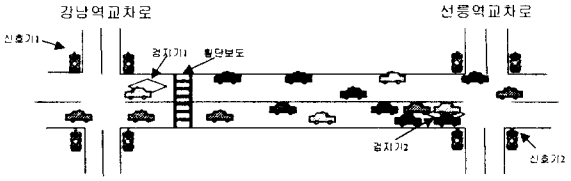


그림5. 그림4 PES의 개념도

의 도로망 시뮬레이션 구조의 예는 그림4와 같을 수 있으며, 이 구조를 개념화시킨 그림은 그림5와 같다. 이러한 방법으로 생성된 대상 시뮬레이션 구조 (교통류 규조)상의 각 엔티티 마다 해당 동역학 (미시적 및 거시적) 모델이 합성됨에 의해 최종적 시뮬레이션 모델이 구축된다.

III. 계층구조적 교통류 모델링

교통 시스템은 기본적으로 시간에 따라 상태가 연속적으로 변하는 연속시간 시스템이다. 그러나 본 논문에서는 이러한 연속시간 시스템으로부터 추상화 관계를 통한 미시적 모델을 도출하고, 미시적 모델들을 통한 시뮬레이션 실험으로부터 거시적 모델을 도출하는 모델 추상화 관계를 제안한다. 도로 교통망의 모델링 접근 방법에는 미시적 모델과 거시적 모델로 구분할 수 있다. 미시적 모델은 개별 차량을 대상으로 하여 신호 제어 전략 등 주로 교통 운영에 관한 분석을 목적으로 하는 것으로 개별차량을 대상으로 하여 차량추종(Car-Following)이나 차선변경

(Lane-Changing) 등의 이론을 적용한다. 이 방법론은 주로 작고, 간단한 시스템을 시험하는데 적합하다. 거시적 모델은 개별 차량의 형태에 의하지 않고 교통류율, 밀도, 속도 등의 자료와 교통류 이론을 기초로 교통류를 표현함으로 주로 광역 가로망을 대상으로 하는 교통 계획 등에 적합한 모델이다[5,8,9,10].

3.1 미시적(microscopic) 모델링

미시적 모델은 이산시간기반 접근으로서 개개의 차량에 대해 차량추종, 차선변경 등의 이론을 적용하여 일정한 시간 간격마다 개별 차량의 변화를 파악한다.

차량추종(Car Following) : 차량추종모형은 그림6과 같이 차량의 가감속이 선행차에 의해 제약을 받는 제약교통류 조건에서의 차량운행특성을 결정하는 모형으로 미시적 교통류모사의 핵심을 이루는 부모형이다. 차량추종 모형은 식1과 같은 일반적인 형태를 가진다.[8,11,12]

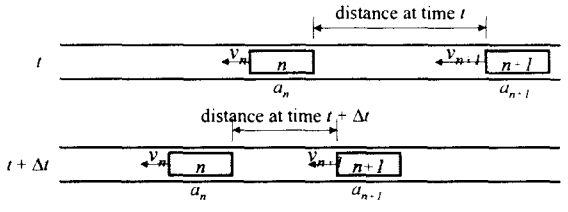


그림6. 차량추종(Car Following) 모형

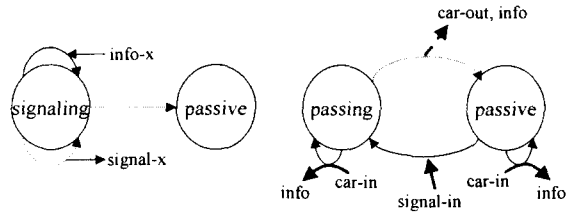
$$a_{n+1}(t + \Delta t) = \alpha [\, v_n(t) - v_{n+1}(t)] \quad (식\text{-}1)$$

여기에서, α는 $\frac{c v^{m}_{n+1}(t+\Delta t)}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^{l}}$ x_n과 v_n은 각각 선두차량의 위치와 속도, x_{n+1}과 v_{n+1}은 뒷차량의 위치와 속도를 나타내며 a_n은 가속도를 나타낸다. 또한 t는 시간을 나타내는 변수이며 c, l, m은 차량추종모형의 변수이다. 위 식1에서 구하고자 하는 $a_{n+1}(t + \Delta t)$은 n+1번째 차의 가속도로써, 이 car-following 모델의 적용을 통하여 구하고자 하는 뒷차의 가속도가 된다. 즉, 앞차와 뒷차의 속도와 거리 관계를 감안하여, 뒷차의 가속도를 구하는 것이 차량추종모형이론이다.

차선변경(Lane Changing) : 차선변경모형은 추종모형과 함께 다차선 도로의 미시적 교통류를 모사하는 핵심모형으로 다양한 상황에 따라 수행되는 운전자의 의사결정과정을 포함하므로 상당히 복잡하다. 차선변경은 기하구조, 교차로에서의 회전, 합류, 연결로 진입 때문에 발생하는 강제적 차선변경(Mandatory Lane Changing)과 더 좋은 조건에서 주행하기 위한 운전자의 판단에 의해 발생하는 선택적 차선변경(Discretionary Lane Changing)으로 구분된다.[7,11]

3.2 거시적(macroscopic) 모델링

거시적 모델의 경우 이산사건기반 접근으로서 개개의 차량보다 일정 신호 주기마다 도로 내에 있는 차량군의 변화를 파악한다. 차량군의 변화는 미시적 모델에서의 차량추종이나 차선변경 이론 등이 적용된 시뮬레이션 실험으로부터 얻을 수 있는 개별 차량들의 행위를 추상화함으로써 얻는다. 그림7은 거시적 모델링에 의해 작성된 *CROSS* 모델과 *ROAD*모델에 대한 상태전이도를 나타내는 것으로서 그림7(a)의 *CROSS* 모델은 signaling 상태에 있을 때 info-x port를 통해 주변 도로에 대한 정보 (예를 들면 각 도로의 차량대수 등)를 받는다 또한 각각의 signal-time 동안 signaling상태를 hold하고 있다가 각각의 도로에 signal-time 후 signal을 보낸다. 그림7(b)의 *ROAD*모델은 *CROSS*모델로부터의 signal정보를 받은 뒤 인접 *ROAD*모델로 차량군을 내 보낸다.

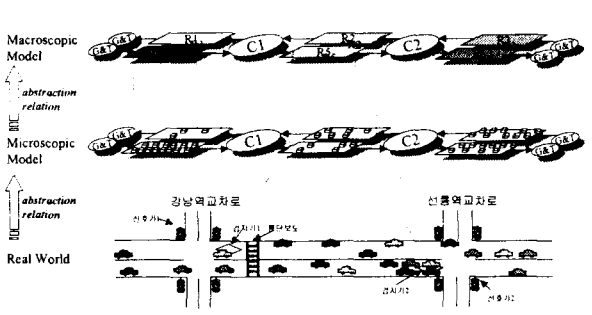


(a) CROSS (b)ROAD

그림7. 모델의 상태전이도(거시적 모델)

3.3 미시적 및 거시적 모델간의 추상화 관계

그림8은 실세계의 교통류 모델로부터 미시적 모델과, 거시적 모델로의 추상화 관계를 보여준다. 여기에서 실세계



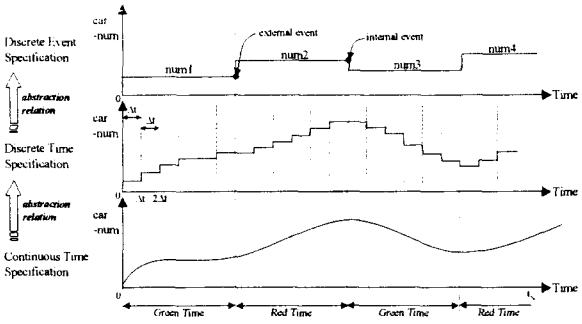


그림8. 추상화 관계에 의한 교통류 모델의 계층구조적 표현

의 교통류 모델은 연속시간시스템으로 연속적인 시간의 흐름에 따라 변화하는 변화량으로 시스템을 표현한다. 여기에서 연속시간시스템인 실세계의 교통류 모델을 *CROSS*와 *ROAD* 모델로 분류하고 개별 차량에 대하여 차량추종 및 차선변경 등의 이론을 적용함으로써 이산 시간기반의 미시적 모델를 생성시킨다. 또한 이산시간모델들에 대한 시뮬레이션 실험을 통하여 얻어지는 개별 차량들에 대한 각종 변수 값들을 이용하여 이산 사건 기반의 거시적 모델에서 요구하는 차량군에 대한 추상화 관계에 의한 표현이 가능하게 된다.[3,6]

IV. 시뮬레이션 실험

본 장에서는 앞서 제안한 미시적 모델로부터 추상화 관계를 통한 거시적 모델의 생성에 대한 실험을 한다. 그림9는 일반적인 도로 교통망에 대한 SES 표현이며, 그림10은 시뮬레이션 실험 도로망에 대한 구조를 보여준다. 시뮬레

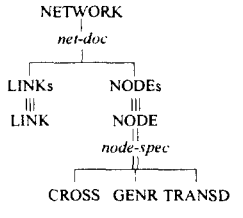


그림9. 도로 교통망의 SES

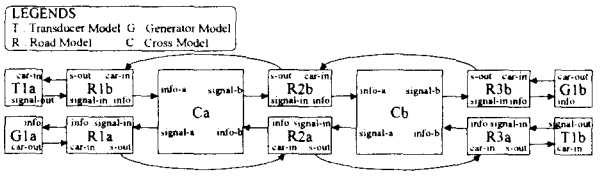


그림10. 도로 교통망 모델링 구조 예

이션 구조에서 볼 수 있듯이 2개의 교차로를 가지는 주/간선도로 교통망을 선정하여 테스트하였다. Generator는 포아송분포에 따라 λ를 변화시키며 차량을 발생시킴으로 도로의 혼잡도를 나타낸다. 그림11은 그림10의 도로 교통망 구조에서 R2a(두번째 ROAD)모델에 대한 미시적 및 거시적 시뮬레이션 실험 결과를 보여주는 것으로써 교차로의 신호주기는 직진만을 고려하여 녹색신호(GT) 5초(그림에서 50), 적신호(RT) 5초, λ는 1로 가정하여 실험하였다. 또한 미시적 모델에 대한 실험은 차량추종이론이 적용되었으며, 거시적 모델에 대한 실험은 미시적 모델의 시뮬레이션 실험을 결과 얻어진 값을 가지고 수행되었다.

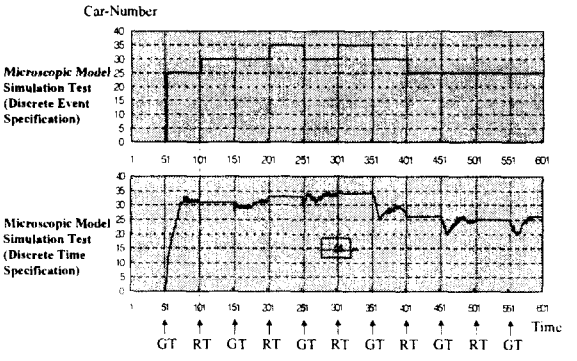


그림11. 시뮬레이션 실험 예

V. 결론

본 논문에서는 이산 사건 형식론을 이용한 거시적 및 미시적 교통류 시뮬레이션 방법론의 개발에 있어 미시적 모델과 거시적 모델(이산시간형식론과 이산사건형식론)의 통합 모델링 환경의 구축시 미시적 모델들로부터 추상화에 의한 거시적 모델의 자동생성 등의 설계상의 효율뿐 아니라 모델간의 일관성을 통한 모델 유효성을 보장할 수 있다는 것을 보였다. 본 연구는 기존의 연구에 비하여 1) SES/MB를 기반으로 시스템 이론적이며 소프트웨어공학적인 접근을 하였으며, 2) 기존제어 방식의 검증 및 신뢰도 분석이 가능하고, 3) 각종 사건, 사고의 시간별 파급효과 분석, 4) 도로건설 계획안에 대한 타당성 검토, 5) 운전자 및 관리자를 위한 예측된 교통정보 등을 제공이 가능하다는 특징을 갖는다. 또한 향후 연구방향으로는 개별차량에 대한 보다 실질적인 연구를 통하여 미시적 모델의 실험적 검증과 이를 통한 거시적 모델로의 자동화 생성 방안 등에 대한 깊이있는 연구가 진행되어야 하겠다.

VI. 참고문헌

[1] B.P. Zeigler, *Object-oriented Simulation with Hierarchical, Modular Models: Intelligent Agents and Endomorphic systems*, Academic Press, 1990.

[2] B.P. Zeigler, *Multifaceted Modeling and Discrete Event Simulation*, Academic Press, 1984.

[3] Cheng-Jye Luh and B.P. Zeigler, "Abstracting Event-Based Control Models for High Autonomy Systems", *IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics*, Vol. 23, No. 1, pp 42-54. Jan./Feb., 1993.

[4] S.D. Chi, *Modeling and Simulation for High Autonomy Systems*, Ph.D. Dissertation, Dept. of Electrical and Computer Engineering, Univ. of Arizona, 1991.

[5] S.D. Chi, J.O. Lee, and Y.K. Kim, "Using the SES/MB Framework to Analyze Traffic Flow", *Trans. of Computer Simulation International*, Vol. 14, No. 4, pp.211-221 Dec., 1997.

[6] B. P. Zeigler, Y. Moon, V. L. Lopes and J. Kim, "DEVS Approximation of Infiltration Using Genetic Algorithm Optimization of a Fuzzy System", Journal of Mathematical and Computer Modeling , vol. 23, pp. 215-228, June, 1996.

[7] Qi Yang "A Simulation Laboratory for Evaluation of Dynamic Traffic Management Systems", Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil and Environmental Engineering, M.I.T, 1997.

[8] S. O. Simonsson, Car-following as a Tool in Road Traffic Simulation, *Proc. of IEEE-IEE Vehicle Navigation and Informations Systems Conf.*, Ottawa, Canada, Oct. 1993, pp. 150--156.

[9] J. Holtzman, J. Hui, N. Moayeri, I. Seskar, H. Varma, J. Yip, S. Maric, T. Williams, A Hehicular Traffic GIS and Simulator for Route Guidance on NY/NJ Highways, *Proc. of IEEE-IEE Vehicle Navigation Systems Conf.*, Ottawa, Canada, Oct. 1993, pp. 367--372.

[10] 하 동익, 오 영태, 정 준하, 도시 가로망시설 운영 효율 평가를 위한 모의 실험 모형 개발, *대한교통학회지*, 13권 1호, 1995, pp. 185--203.

[11] 박창호 외, "교통관리 효과분석을 위한 모의 실험 모형 개발(I)", 건설교통부 '96년 연구개발사업 연차보고서, 서울대학교 공학연구소, Feb. 1998.

[12] Lee David Han "Traffic Flow Characteristics of Signalized Arterials under Disturbance Situation", Ph.D. Dissertation, Univ. of California at Berkeley, 1992..