

□ 論 文 □

이산 사건 모델링 및 시뮬레이션을 이용한 교통 흐름 분석 방법론

Traffic Flow Analysis Methodology Using the Discrete Event Modeling and Simulation

李 資 玉

(韓國航空大學校 컴퓨터工學科 大學院)

池 承 道

(韓國航空大學校 컴퓨터工學科 助教授)

目 次

I. 서론	4.2 고속도로 교통망을 위한 Cell Space 모델링 개념
II. 연구 배경	4.3 Symbolic DEVS를 이용한 신호 제어 방식 분석 모델링 방법론
2.1 기존 방법론과 이산 사건 방법론	V. 교통 흐름 시뮬레이션 테스트
2.2 교통 흐름 분석에 대한 시뮬레이션의 역할	5.1 주/간선 도로 교통 흐름 분석
III. System Entity Structure/Model Base (SES/MB) 소개	5.2 고속도로 교통 흐름 분석
3.1 SES	5.3 Symbolic DEVS를 이용한 신호 제어 방식 분석
3.2 MB	VI. 결론
3.3 Symbolic DEVS	
IV. SES/MB를 이용한 도로 교통망 모델링 방법론	
4.1 주/간선 도로 교통망 모델링 방법론	

ABSTRACT

Increased attention has been paid in recent years to the need of traffic management for alleviating urban traffic congestion. This paper presents a discrete event modeling and simulation framework for analyzing the traffic flow. Traffic simulation models can be classified as being either microscopic and macroscopic models. The discrete event modeling and simulation technique can be basically employed to describe the macroscopic traffic simulation model. To do this, we have employed the System Entity Structure/Model Base (SES/MB) framework which integrates the dynamic-based formalism of simulation with the symbolic formalism of AI. The SES/MB framework supports to hierarchical, modular discrete event modeling and simulation environment. We also adopt the Symbolic DEVS (Discrete Event System Specification) to developed the automated analysis methodology for generating optimal signal light policy. Several simulation tests will demonstrates the techniques.

* 본 논문은 정보통신부의 지원을 받아 수행중인 분산형 멀티미디어를 이용한 차세대 교통정보 안내 시스템 개발 프로젝트의 일부임.

I. 서론

서울시의 교통 혼잡은 빠른 경제 성장의 결과로 인해 나날이 심각해지고 있다. 증가하는 차량들, 제한되고 비정돈된 가로망의 특성 등의 교통 환경으로 인해 대도시의 교통 혼잡 해소가 시급한 실정이다. 도로 교통망의 모델링 접근 방법에는 미시적 모델 (microscopic model) 과 거시적 모델 (macroscopic model) 로 구분할 수 있다. 미시적 모델은 개별 차량을 대상으로 하여 신호 제어 전략 등 주로 교통 운영에 관한 분석을 목적으로 하는 것으로 car-following, lane-changing 규칙 등의 이론적 배경을 필요로 한다. 이 방법론은 주로 작고, 간단한 시스템을 시험하는데 적합하다. 거시적 모델은 개별 차량의 형태에 의하지 않고 flow rate, 밀도, 속도 등의 관계로 교통류를 표현함으로 주로 광역 가로망을 대상으로 하는 교통 계획 등에 적합한 모델이다 [1,2,3].

본 논문에서는 System Entity Structure/Model Base (SES/MB) 라는 Discrete Event System Specification (DEVS) 형식론을 구현한 소프트웨어 환경을 사용하여 복잡한 도로 교통망의 용이한 구조적 표현, 이산 사건 모델링 기법을 이용한 도로 교통망의 동역학적 표현, 재사용성이 가능한 계층 구조적 모델들의 구성을 용이하게 한다. 또한 미시적인 접근 방법뿐 아니라 거시적인 접근 방법도 제공하고, 신호 제어 방식, 교통 상황 등을 고려한다는 특징을 갖는다 [4, 5].

제안된 방법론은 Advanced Traffic Management System (ATMS) 의 운영자적 측면에서 split, offset, cycle 등의 신호등 제어를 통해 신호 제어 평가에 적합한 수단을 제공하고, 시뮬레이션을 사용해 혼잡도 파급 효과에 대한 정보를 예측하고, 분석함으로써 사용자가 도로 주행시

효과적인 운영을 도모할 수 있도록 하는 Advanced Traveler Information System (ATIS) 에 적합한 수단을 제공한다. 이를 위해 주/간선 도로 교통망과 고속도로 교통망을 DEVS를 이용해 거시적 방법으로 모델링하고, 시뮬레이션 테스트 방법을 통해 여러가지 신호 제어 정책을 평가하고 정상시 그리고 비정상시의 혼잡도 파급 효과를 분석, 검증하였다. 고속도로 교통망에서처럼 세분화한 구간별 분석이 요구될 때에는 cell space 모델링 기법을 사용하여 동일한 속성을 가지는 모델로 분해해 미시적인 방법의 테스트를 할 수 있다. 또한 심층 추론에 사용되는 Symbolic DEVS를 이용해 최적의 신호 제어 방식을 구하는 자동화 방법론을 제시한다.

본 논문의 II장에서 교통 흐름 분석에 대한 기존의 방법론과 교통 흐름 분석에 대한 시뮬레이션의 역할에 대해 살펴보고, III장에서는 본 연구에 이용된 SES/MB 및 Symbolic DEVS의 기본적인 개념을 소개한다. SES/MB를 이용한 도로 교통망 모델링에 대한 접근 방법을 IV장에서 기술하고, V장에서는 제안된 모델링 방법론을 적용한 시뮬레이션 분석을 통해 타당성을 입증한다.

II. 연구 배경

2.1 기존 방법론과 이산 사건 방법론

교통 흐름 분석을 위한 기존의 시뮬레이션 방법론들은 해석적인 모델을 이용한 제한적 접근 방법을 사용한다. 즉, 차량의 전반적인 흐름 보다는 개별 차량을 대상으로 하여 도로 교통의 운영을 분석하는 방법인 미시적인 접근 방법을 주로 사용하고 있다 [1,2,3]. 이와는 달리, 차량의 전반적인 흐름 파악을 위한 거시적 접근

근 방법 중의 하나로 최근에 일본에서 생체 회로망을 이용해 교통 혼잡도 예측 시스템을 개발하여 주목받은 바 있다 [6]. 그러나 이 시스템의 경우 신호 제어 방식이 고려되지 않았고, 또한 정상적인 상태일 경우의 혼잡도 예측만이 가능하여 실용적 측면에서는 큰 의문점을 갖는다. 이에 비해 본 논문에서 제안한 방법론은 기존의 접근 방법과는 달리, 1) 복잡한 도로 교통망의 용이한 구조적 표현, 2) 이산 사건 모델링 기법을 이용한 도로 교통망의 동역학적 표현, 3) 객체 지향을 기반으로 계층 구조적이며 모듈화된 소프트웨어 환경을 통한 모델의 재사용성, 독립적 테스트성 및 확장성을 제공하며, 4) 미시적인 접근 방법뿐 아니라 거시적인 접근 방법도 제공하고, 5) 신호 제어 방식을 고려한 동역학적 모델을 사용하고, 6) 정상 및 비정상시의 혼잡도 파급에 의한 교통 흐름 예측이 가능하다는 장점을 갖는다 [45]. 4.1절에서 설명될 방법론은 거시적인 방법론을 사용한 것이고, 4.2절에서 설명될 cell space 방법론을 사용해 모델을 더 작은 레벨로 분할하였을 경우 미시적인 접근 방법도 가능하다. 또한 4.3절에서 설명될 Symbolic DEVS를 이용한 최적 신호 제어 방식의 선정에 대한 것은 모든 발생 가능 사건 시간들을 symbol로 표현함으로써 발생 가능한 모든 사건들의 시간 궤적을 자동 생성시켜 주어진 goal 상태에 이르는 모든 사건과 시간 관계를 추론해 낼 수 있다.

2.2 교통 흐름 분석에 대한 시뮬레이션의 역할

ATMS에 대한 시뮬레이션의 역할은 다음과 같다: 1) 신호 제어 정책 분석을 효과적이고 신뢰성있게 할 수 있고, 2) 도로상에서 발생하는 사고, 도로의 상태나 구조 등등에 따른 혼잡도

파급을 예측할 수 있다 3) 최적의 신호등 제어 알고리즘을 알아낼 수 있고, 4) 이러한 교통의 효과를 통해 신도시 도로망 계획 등에 적용할 실행 가능성 있는 연구를 제시해 준다. ATIS에 대한 시뮬레이션의 역할은 교통 흐름 분석을 통해 교통 혼잡도를 예측할 수 있어 예측정보 제공과 함께 효과적인 운전의 경로를 발견하는데 도움을 줄 수 있다.

III. System Entity Structure/Model Base (SES/MB) 소개

SES/MB는 Zeigler에 의해 처음 제안된 개념으로 기존의 동역학적인 방법론과 AI의 기호적 방법론의 시스템적인 결합 환경을 제공한다. SES/MB는 다음의 두 가지로 구성된다: system entity structure (SES)와 model base (MB).

3.1 System Entity Structure (SES)

SES는 선언적 특징을 가지며, 구성원들의 분할, 분류, 결합 관계, 제약 조건 등을 표현할 수 있는 구조체를 말한다 [47]. SES는 entity, aspect, 그리고 specialization의 3가지 모드로 구성되어 있다. Entity는 어떤 실체를 나타내는 모델에 해당하며 여러개의 aspect와 specialization을 가질 수 있다. Aspect는 entity의 여러 구성 부분들을 나타내며, 여러개의 entity를 가질 수 있다. Specialization은 entity에 대한 분류를 나타낸다. SES로 표현되는 여러 가능한 구조 중에서 하나의 대상이 되는 구조를 선택하기 위해서 pruning이라는 과정을 이용할 수 있다. Pruning은 SES가 나타내는 여러 구조 중 하나의 구조를 선택하는 것이고, 이 결과로 Pruned Entity Structure (PES)가 생성된다.

3.2 Model Base (MB)

MB는 절차적 특징을 가지며, 동역학적 그리고 기호적인 표현 수단을 제공하는 모델들로 구성된다. 이산 사건 모델링을 위한 대표적인 형식론인 DEVS 모델은 연속적인 시간상에서 이산적으로 발생하는 사건들에 대하여 시스템의 행위를 측정하는 것으로 다음과 같은 형식론에 의해 모델을 표현한다 [4,5,7,8,9]

$$M = \langle X, S, Y, \delta_{in}, \delta_{ext}, \lambda, ta \rangle$$

여기에서 X : 입력 집합

S : 상태 집합

Y : 출력 집합

δ_{in} : S→S, 내부상태 전이함수

δ_{ext} : Q×X→S, 외부상태 전이함수,
 $Q = \{(s,e) | s \in S, 0 \leq e \leq ta(s)\}$

λ : S → Y, 출력 함수

ta : S → ${}^+R_0, \infty$, 시간 진행 함수,
 단 R_0^+, ∞ , 는 음수를 제외한 실수 집합

입력 집합 X는 시스템 외부에서 발생하는 사건들의 집합을 의미하고, 출력 집합 Y는 출력 변수들의 집합을 나타낸다. 상태 집합 S는 상태 변수들의 각 정의 구역들의 공급집합을 의미하며 상태 s ($\in S$)는 시간 진행에 따른 시스템의 순차적인 snap shot 상태를 의미한다. 시간 진행 함수 ta(s)는 시스템이 외부 사건을 입력 받지 않는 한 상태 s에 머물 수 있도록 허용한 시간으로 정의한다. 내부 상태 전이 함수 δ_{in} 는 외부의 사건이 없는 경우 시간 진행에 따라 모델의 상태변화를 설명해 주는 함수로 정의하고, 외부 상태 전이 함수 δ_{ext} 는 시스템 외부에서 발생한 사건에 의한 모델의 상태변화를 나타내는 함수로 정의한다. 출력 함수 λ 는 상태 s에서의 시스템 출력으로 정의한다.

3.3 Symbolic DEVS

기존의 DEVS의 시간대가 실수였던 것을 선형 다항 기호식으로 확장시킴으로써 사건 시간의 기호적 표현을 가능하게 한 확장된 Symbolic DEVS가 Chi와 Zeigler에 의해 발표되었다 [10,11]. 예를 들어, "5+2* 'travel-time+ 'delay-time"이라는 표현은 실질적인값이며 여행할 때 필요로 하는 시간을 나타낸다고 볼 수 있다. 'travel-time과 'delay-time에 수치값이 대치될 때, 이 수식은 실수로 계산되어 진다. 이처럼 어떤 사건의 정확한 지식은 기호값을 실수값으로 적용함에 의해서 쉽게 대치되어질 수 있다. 그러므로 Symbolic DEVS는 기존 DEVS 이론의 확장이라고 할 수 있으며, Symbolic DEVS는 모든 시간값들이 실수값으로 대치될 때 기존 DEVS로 복귀된다. 이것은 미분 방정식 모델의 질적 (qualitative) 표현 방법들이 보다 많은 지식 정보 획득에 따른 대가로 정확한 시간값들을 손실해야 한다는 특징과 좋은 대조를 이룬다.

Symbolic DEVS 구성원들의 network 또는 결합 모델 (coupled model) 은 실수의 사건 시간을 갖는 기존 DEVS의 경우와는 달리 발생 가능한 사건 시간들 중 현재 일어나야 할 사건 시간이 결정지워 질 수 없다. 그러므로 시뮬레이션 궤적은 트리 형태로 분리되어 진다. 예를 들면, 발생 가능 사건 시간의 집합이 {t1, t2}인 경우 t1의 값이 작을 수도 (t1<t2), 또는 t2의 값이 작을 수도 (t2<t1) 있다. 이와 같은 경우 symbolic 시뮬레이션은 두개의 가치를 쳐나감 (branching)에 의해 각 경우를 모두 시뮬레이션 한다. 또한, "t1<t2"의 궤적 다음에 "t2<t3"라는 조건의 경우를 시뮬레이션 할 때, 시뮬레이션의 효율적인 관리를 위해 앞의 두 조건을 "t1<t3"라는 함축적인 조건으로 추론해야 할

필요가 생기는데, 이와 같은 선형 다항식으로 표현되는 symbolic 시간 조건들의 효율적 관리와 추론을 위한 알고리즘은 이미 Chi와 Zeigler에 의해 개발되어 발표된 바 있다. 현재 일어나야 할 사건의 시간이 결정되지 않는 Symbolic DEVS에서의 내부 상태 전이 함수 δ_{int} 는 $S \times LP_0^+, \infty, \rightarrow$, S와 같은 형식론에 의해 모델이 표현되고 외부의 사건이 없는 경우 시간 진행 값인 LP_0^+, ∞ , 에 따라 모델의 상태변화를 설명해 주는 함수로, LP_0^+, ∞ , 는 ∞ 로 인접하는 0이 아닌 실수상의 선형 다항식 (LP: Linear Polynomial)으로 표현되는 symbolic 시간들을 의미한다. 사건 진행 함수 $ta(s)$ 는 $S \rightarrow \mathbb{Z}^{LP_0^+, \infty}$ 로 표현되며, 유한한 선형 다항식의 symbolic 시간들의 집합으로 이루어져 있다 [11].

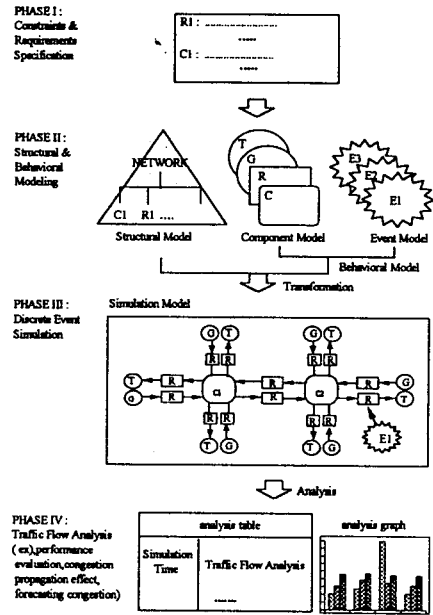


그림 1. 이산 사건 시뮬레이션을 이용한 도로 교통 흐름 분석 방법론

IV. SES/MB를 이용한 도로 교통망 모델링 방법론

4.1 주/간선 도로 교통망 모델링 방법론

그림 1에서 나타난 바와 같이 PHASE I에서는 제한조건과 요구사항 등을 통해 분석 대상을 선정하고, PHASE II에서는 분석 대상 도로 교통망에 PHASE I을 통해 얻은 분석 목적에 따른 pruning에 의해 SES가 entity structure base (ENBASE)에 저장된다. 계층구조적 시뮬레이션 모델은 이미 구축된 model base (MBASE)로부터 작업 메모리에 있는 PES에 transform 함수를 적용함으로써 생성된다. PHASE III는 시뮬레이션 모델에 주어진 입력 명령을 가함에 의해 진행되며 시뮬레이션 결과의 분석을 통해 PHASE IV에서처럼 혼잡도 예측 정보를 얻을 수 있다.

전체적 도로 교통망 구조는 그림 2와 같은 SES를 가지며, 이 SES에 pruning 과정을 통해 구성된 도로 교통망 모델링 구조의 예는 그림 3과 같다.

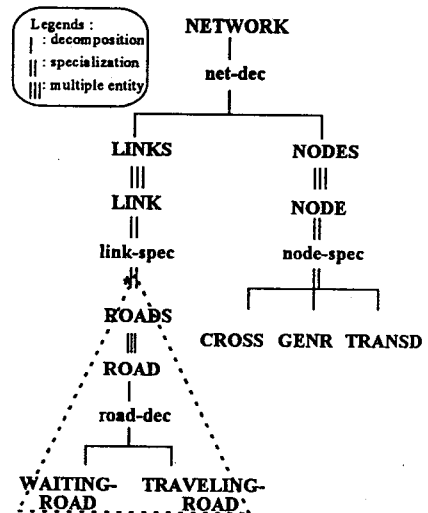


그림 2. 도로 교통망의 SES

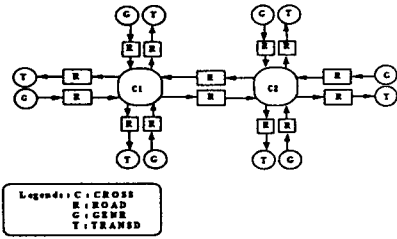


그림 3. 주/간선 도로 교통망 모델링 구조 예

도로 교통망 모델은 node와 link들로 구성된다. node에는 교차로를 나타내는 CROSS, 차량의 진입을 나타내는 GENR (generator), 차량의 진입의 끝을 나타내는 TRANSD (transducer) 등의 모델로 분류되며, link에는 node와 node사이의 단방향 통행로를 의미하는 ROAD 모델이 있다. MBASE내에 있는 각 모델들에 대한 설명은 다음과 같다.

CROSS : 교차로를 의미하는 신호등 모델. 이 CROSS는 주어진 신호 방식에 따라서 인접한 ROAD들에게 신호를 보내준다. 신호 방식은 cycle, split, 그리고 offset에 의해서 특성화되어 진다 [12,13]. CROSS의 상태 전이도가 그림 4에 보여진다. 여기서 CROSS가 'signaling' 상태에 있을때 'info-x' 포트를 통해 주변 도로에 대한 정보 (예를 들면 각 도로에 차량을 몇

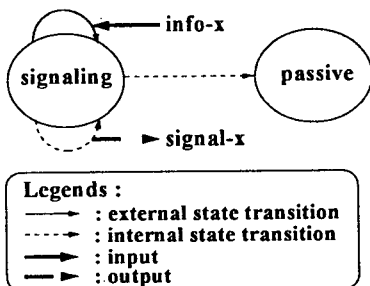


그림 4. CROSS 상태 전이도

대나 더 수용할 수 있는지에 대한 정보) 를 받는다. 각각의 'signal-time'동안 'signaling'상태를 유지하고 있다가 'signal-time'이 지난 후 각각의 도로에 신호를 보낸다.

ROAD : node들 사이의 단방향성을 가지는 도로 모델. node들은 CROSS, GENR, 그리고 TRANSD이다. 이 ROAD 모델들은 도로 상황, 차량 대수, 차선 수, 교통 상황 및 통제 계획 등의 변수를 근거로 green split과 passing rate에 의해서 결정되어 진다. 사고의 발생의 유/무는 이 ROAD 모델에 표현된다. ROAD 모델은 도로에서 교통 분석의 모델링 목적에 따라 더 세분화 되어질 수 있다. 예를 들어, 각 도로상에서의 차량들을 특성별로 나누었을 경우 대기하고 있는 차량들과 운행중인 차량들로 볼 수 있다. 이런 관점에서 ROAD 모델을 W-ROAD (waiting road), T-ROAD (traveling road), 그리고 R-MGR (road manager) 로 나눌 수 있다 [14]. 이것은 그림 5에서 보여진다. 그림 2의 도로 교통망 SES의 *처럼 도로들은 분석에 요구되는 기능에 의해 물리적 방법이 아닌 논리적인 개념을 통해 여러개의 ROAD cell로 나눌 수 있다. 그림 6 (c)도로와 같은 경우 좀 더 세분화함으로써 도로 구간의 특성을 더 자세히 분석할 수 있을 것이다. 즉, 하나의 도로 모델

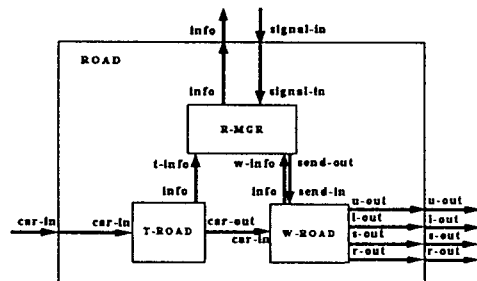


그림 5. 도로의 Decomposition 구조

(c)에서 (c1), (c2), ..., (cn)의 다수 모델들로 분할할 수 있다. 그러므로 우리는 도로위에서의 활동을 분석 목적에 맞도록 세분화함으로써 미시적인 단계로의 분석도 가능하다. 이런 방식으로 여러 가지의 분석 단계 (미시적 그리고 거시적) 를 시험해 볼 수 있다.

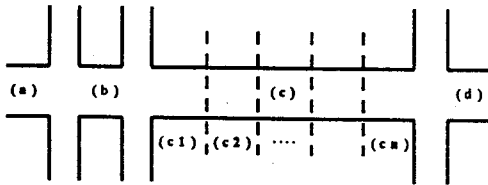


그림 6. 도로의 Conceptual View

GENR : 차량 발생 모델. CROSS와 ROAD의 혼합형 모델로서 대상 교통망의 외부적인 차량의 입력을 나타낸다. CROSS와 마찬가지로 주어진 신호 방식에 따라서 차량을 발생시킨다.

TRANSD : 차량 흡수 차단 모델. CROSS와 ROAD의 혼합 모델로 대상 교통망의 외부적 차량의 출력을 나타낸다. 주어진 신호 방식에 따라 인접한 ROAD에 신호를 보내어 인접한 ROAD들로부터 차량을 받는다.

4.2 고속도로 교통망을 위한 Cell Space 모델링 개념

앞장에서, ROAD 모델을 그 기능에 의해서 더 작은 모델로 분해할 수 있었다 (W-ROAD와 T-ROAD로 설계의 요구에 의해서 분해함). Cell space 모델링 기법은 좀 더 세분화한 분석이 요구될 때 추상화와 관련된 모델을 만드는 데 효과적인 방법을 제공해 준다 [7]. 고속도로 교통 망은 오직 link로만 구성된다. 이것은

미시적 단계의 분석을 가능하게 하는 것으로 도로를 공간적인 작은 부분으로 분해하는 것이다. 고속도로는 언덕, 터널 등 교통 흐름이 다른 구간이 있기 때문에 하나의 도로 모델로 분석하기에는 문제가 있다. 따라서, 그림 6의 (c) 도로처럼 도로를 몇 개의 구간으로 나누어서 자세한 분석이 될 수 있도록 한다. 고속도로 교통망의 cell space 모델 구조는 그림 7에서처럼 작은 cell들로 구성되어 있는 것을 볼 수 있다. 이 작은 cell들은 동일성의 속성을 가지는 공간적으로 분산되어 있는 모델들로 생각하면 된다. 고속도로 교통망의 전체적인 구조는 그림 8과 같은 SES 구조를 갖게 된다. Cell space 모델의 전통적인 프로토타입은 이산 형태 내에서 공간과 시간으로 표현되는 cellular automaton이다. 이것은 어느 짧은 순간에 공간내에서 동일성은 시스템이 공간적인 불변성을 가지고 진행될 뿐 아니라 시간적인 불변성을 가지고도 진행된다는 것을 의미한다. 이런 동일성은 오직 하나의 cellular 모델과 그 이웃간의 상호작용의 명시를 통해 모델링 작업을 단순화시킬 수 있는 장점을 갖는다. 각각의 cell에 대한 간단한 설명은 다음과 같다:

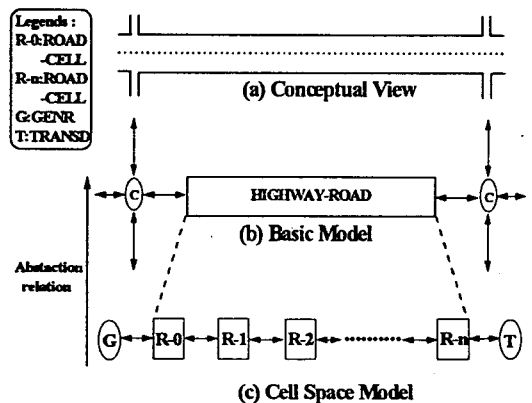


그림 7. 고속도로 교통망에 대한 Cell Space 모델링 구조

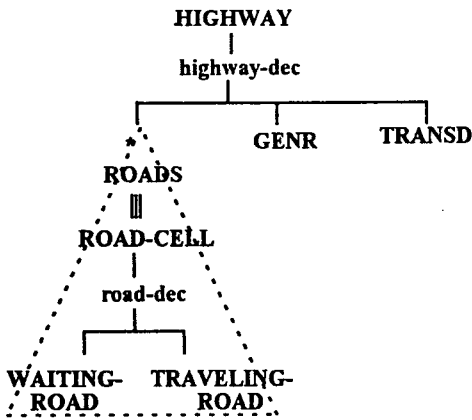


그림 8. 고속도로 교통망의 SES

R : 고속도로의 단방향성의 cell space 모델. 이 모델은 뒤에 있는 cell로부터 차량들을 받는다. Cell의 거리와 평균 속도에 의해서 주어진 주기적인 event time에 의해 앞의 cell에게 차량들을 보내게 된다. R 모델은 주/간선 도로의 교통망 모델링 방법론에서 설명되어진 바와 같이 각 cell의 교통 특성에 기초해서 더 작은 모델들로 나뉘어질 수 있다.

4.3 Symbolic DEVS를 이용한 신호 제어 방식 분석 모델링 방법론

분석 대상 도로 교통망 모델의 구조적 지식과 행동적 지식은 SES와 Symbolic DEVS 형식론을 통하여 표현할 수 있다. 분석 대상의 구조적, 행동적 모델을 만들고 goal을 선정하면, symbolic 시뮬레이션을 위한 준비가 갖추어진다.

그림 9에 나타난 바와 같이, PHASE I은 제약 조건, goal 선정 등에 의해서 분석 대상을 결정하고 PHASE II는 분석 대상의 SES symbolic 모델에 transform 함수를 적용시켜 PHASE III의 시뮬레이션 모델을 형성하게 된

다. 시뮬레이션 모델은 시작 명령에 의해 동작하게 된다. 시뮬레이션은 구성원들간의 결합 관계와 symbol로 표현되는 시간 관계에 따라 주어진 goal 조건을 만족시킬때까지 PHASE IV와 같은 트리 궤적을 자동 생성하면서 진행된다. 이와 같은 방법으로 symbolic 시뮬레이션은 발생 가능한 모든 사건들의 시간 궤적을 자동 생성시킴에 의해 주어진 goal 상태에 이르는 모든 사건과 시간 관계를 추론해낸다. 시뮬레이션 결과로 나타나는 시뮬레이션 궤적은 goal 상태에 도달하는 인과 용보적 사건들의 연결 관계뿐 아니라 그에 따른 시간적 정보도 제공해준다. PHASE V에서는 결과된 트리 궤적의 분석을 통해 goal 조건에 맞는 시간 관계를 얻을 수 있다. 이와 같이 Symbolic DEVS는 시간을 모르거나, 알지만 변하는 경우 등의 모든 경우에 쉽게 적용시킬 수 있으므로, 최적 신호동 제어 방식의 자동 분석에도 효과적으로 응용될 수 있다. Symbolic DEVS를 이용한 도로 교통망 모델의 구조의 예는 그림 10과 같다. 4.1절과 마찬가지로 도로 교통망 모델은 node와 link들의 구성으로 표현되고, node에는 CROSS, GENR, TRANSD 등의 모델로 분류되며, link에는 신호 받기를 기다리며 대기중인 차량들이 있는 W-ROAD 모델과 도로를 운행중인 차량들이 있는 T-ROAD 모델이 있다. 각 모델은 MBASE내에 저장되어 있고, 각 모델들에 대한 간단한 설명은 다음과 같다.

CROSS : 교차로이며 신호등 모델. 이 CROSS는 'green과 'red 두가지의 상태만을 가지며, 뒤에 있는 W-ROAD들에게 신호를 보내준다. CROSS의 상태 전이도가 그림 11에 표현되어 있다. 그림 11에서 'green 상태에서 'green-time이 지난 후 'red 상태로 바뀌고, 'red 상태에서 'red-time이 지난 후 'green 상태

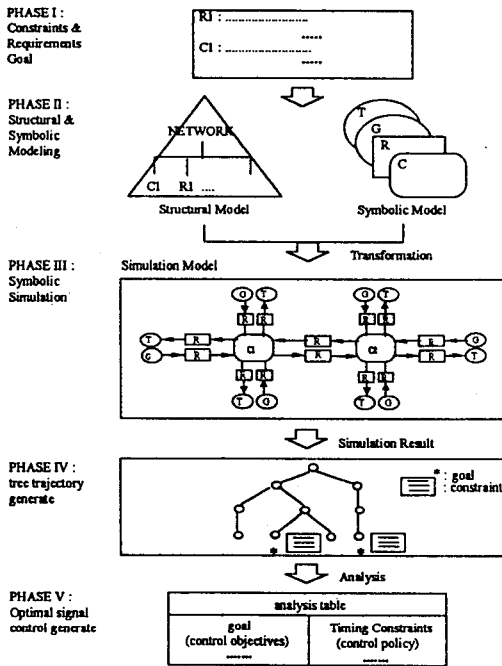


그림 9. Symbolic 시뮬레이션을 이용한 교통 신호 분석 방법론 개념도

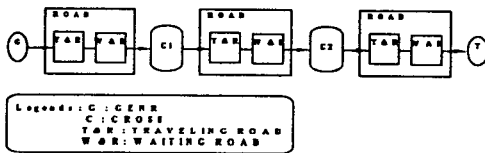


그림 10. Symbolic DEVS에 적용한 도로 교통망 모델링 구조 예

가 되면서 신호를 각 도로에게 보내준다. 여기서 'green-time' 이나 'red-time' 같은 경우는 실제값이 아니므로 시뮬레이션 과정에서 green-time이 작을 수도 ('green-time < red-time) 있고, 'red-time' ('red-time < 'green-time) 이 작을 수도 있다. 이와 같은 경우 symbolic 시뮬레이션은 두개의 가치를 쳐나감 (branching) 에 의해 각 경우를 모두 시뮬레이션 한다. 이처럼 모든 발생 가능 시간에 대해서 가치를 쳐나감에 의해서 찾고자 하는 goal에 도달할 수 있다.

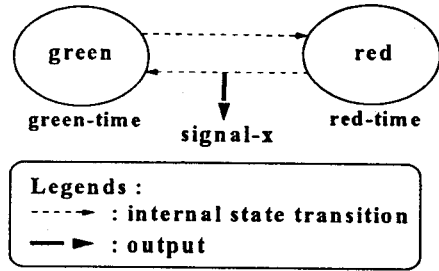


그림 11. CROSS 상태 전이도

W-ROAD : node들 사이의 단방향성을 가지는 도로 모델로서 대기하고 있는 차량들에 대한 개념적 모델. node들은 CROSS, GENR, 그리고 TRANSD이다. 이 W-ROAD 모델들은 정지 신호시 차량들을 대기시키고 CROSS로부터 신호를 받으면 앞의 T-ROAD로 차량을 진입시켜 준다.

T-ROAD : node들 사이의 단방향성을 가지는 도로 모델로서 운행중인 차량들에 관한 개념적 모델. node들은 CROSS, GENR, 그리고 TRANSD이다. 이 T-ROAD 모델들은 CROSS로부터 신호를 받은 후 뒤에 있는 W-ROAD를 통해 받아들인 차량들을 traveling-time동안 운행한 후 앞의 W-ROAD에 차량을 보낸다.

GENR : 외부 입력 모델. CROSS와 ROAD의 혼합형 모델로서 대상 교통망의 외부적인 차량의 입력을 나타낸다. CROSS와 마찬가지로 green과 red상태를 가지며, 이 상태에 따라서 green상태 뒤에 차량을 발생시킨다.

TRANSD : 외부 출력 차단 모델. CROSS와 ROAD의 혼합 모델로 대상 교통망의 외부적 차량의 출력을 나타낸다. 'green 상태와 'red 상태를 가지며, 신호를 뒤의 W-ROAD에게 주어 W-ROAD로부터 차량을 받는다.

V. 교통 흐름 시뮬레이션 테스트

5.1 주/간선 도로 교통 흐름 분석

주어진 교통 모델링 방법론의 대상이 되는 예로써 그림 3에서 보여진 것과 같이 2개의 교차로를 가지는 주/간선 도로 교통망을 선정하여 시뮬레이션을 진행한다. 신호 제어 정책 (offset이 고려되어지는 경우와 고려되어지지 않는 경우), 교통 상황 (사건이 발생했을 경우와 발생하지 않았을 경우), 그리고 교통 흐름 특성 (교통 흐름이 많은 경우와 많지 않을 경우) 에 의해서 여러 가지의 시뮬레이션을 진행하도록 하겠다. 간단한 시험으로, 다음과 같이 가정한다: 각 도로의 초기 차량의 수는 150대이고, 녹색 신호 (green split or green time interval) 일 동안 진행되는 차량의 평균 비율은 5, 5, 10, 그리고 5로 가정한다. 각각은 u-turn, left-turn, straight, right-turn을 나타낸다. Case I ~ Case IV의 4가지의 경우와 이상적인 경우의 2가지를 가지고 시뮬레이션을 진행한다.

Case I : (비연동 제어이고 정상적인 상태) : 각 교차로의 지연 시간 (offset or delay) 은 고려되지 않고, 교통 흐름은 사건이 일어나지 않는다고 가정한다. 그림 13 (a)는 time-space diagram을 설명하는 것으로, 한 무리의 차량이 start로부터 goal까지 도착하는데 걸리는 경과 시간이 그림의 x축에 보이는 elapsed time이다. Starting time축은 start로부터 출발한 차량들의 group interval로 화살표 방향으로 네개 group의 차량들이 generator로부터 발생된다. 처음 start에서 출발한 차량 group은 CROSS1까지 가는 운행 시간이 5이고 교차로에 도착하여 신호를 받지 못하고 다음 신호를 받을때까지의 대기 시간이 7정도이다. 전체 각 도로의 운행 시간은 5정도이고 대기 시간은 7 ~ 9 이다. 즉 초

기 혼잡도가 큰 상태 (heavy) 이다.

Case II : (연동 제어이고 정상 상태) : 교차로간의 지연 시간이 고려되어지고 교통의 흐름은 사건이 일어나지 않은 상태라고 가정한다. 그림 13 (b)는 전체 각 도로의 운행 시간이 5정도이고 대기 시간이 5인 time-space diagram이다. Start를 출발한 차량들이 5정도의 운행 시간 후 첫번째 CROSS에서 5정도의 대기 시간이 지난 후 다시 신호를 받고 운행하다가 두번째의 CROSS에서도 5정도의 대기 시간이 지난 후 goal에 도달하는 것을 볼 수 있다. saved time 만큼 13 (b)가 13 (a)보다 start에서 goal까지의 경과 시간이 적게 걸린 것을 볼 수 있다. 이것은 연동 제어 정책에서 기대했던 것처럼 비연동 제어 (Case I) 보다 더 효과가 좋음을 보여주고 있다.

Case III : (비연동 제어이고 비정상 상태) : 교차로간의 지연 시간이 고려되지 않고 교통의 흐름은 비정상적인 상태 즉, 사건이 발생했을 경우로 가정한다. 그림 12에서처럼 ROAD&3b에서 교통 사고가 일어났다고 가정했을 경우, ROAD&3b에서의 혼잡도는 증가하게 되고, 그 여파가 ROAD&2b로 미쳐 ROAD&2b도 점차 혼잡도가 증가하게 되고, 이것은 다시 ROAD&1b에도 영향을 미치게 된다. 그림 13 (c)는 ROAD&3b에 의해서 혼잡도의 파급이 진행됨에 따라 CROSS2를 통과해야 하는 주변 도로에서의 대기 시간이 길어지게 되는 time-space diagram이다. 그림에서 보이듯이 첫번째 group의 차량들은 아직 사고 여파가 별로 미치지 않았기 때문에 약간의 지체 후에 CROSS2를 통과 하지만, 두번째 group의 차량들부터는 CROSS2에서부터 지연이되는 상태를 보여주고 있다.

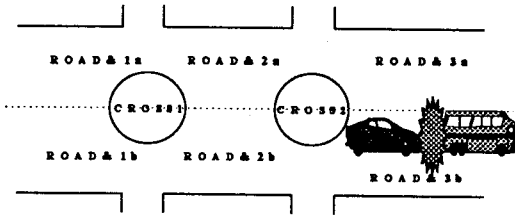
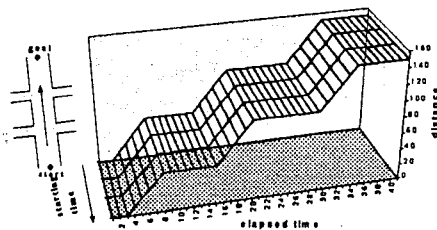


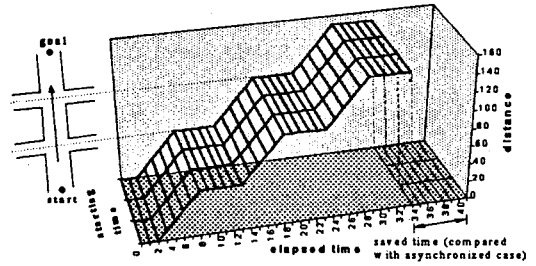
그림 12. 교통 사고시의 개념적인 도로 모습

Case IV : (연동 제어이고 비정상 상태) : 교차로간의 지연 시간이 고려되고 교통 흐름은 비정상적인 상태 (사건이 발생한 상태) 를 가정한다. 그림 13 (d)는 첫번째 group과 두번째 group 이 통과할때의 운행 시간과 대기 시간이 Case III보다 짧지만 ROAD&3b에서의 사건의 효과로 혼잡도의 파급이 증가됨에 따라 연동 제어 정책이 별 효과가 없음을 볼 수 있다.

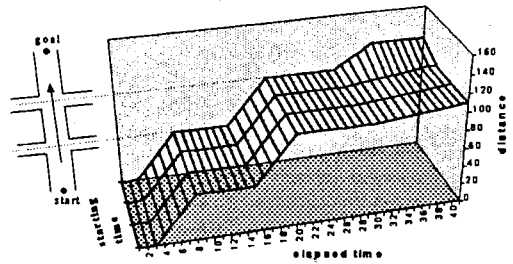
그림 13 (a)와 (b)는 초기의 혼잡도가 작다 (low or empty) 라고 가정한 것으로 Case I과 Case II의 이상적인 경우를 설명하고 있다. (a)의 경우 CROSS1과 CROSS2에서 기다리고 있던 초기의 차량이 아주 작은 경우로, 즉 한산한 상태의 도로일 경우 generator에서 나온 첫번째 무리의 group이 아주 작은 대기 시간이 있는 후 CROSS를 빠져 나가는 것을 볼 수 있다. 특히 (b)의 경우는 가장 최적의 상황으로 교차로에서 지연이 없이 빠져 나가는 것을 볼 수 있다. 두 경우의 시뮬레이션 결과는 연동 제어 정책을 사용했을 경우와 비연동 제어 정책을 사용했을 경우의 차이를 분명히 보여주고 있다.



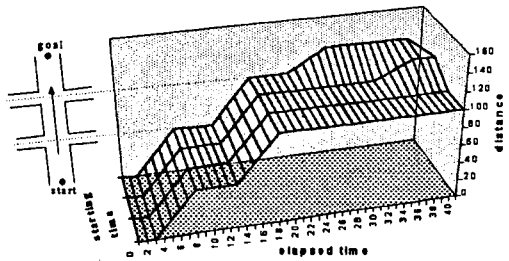
(a) 비연동 제어이고 정상 상태



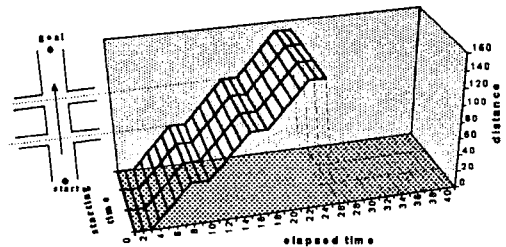
(b) 연동 제어이고 정상 상태



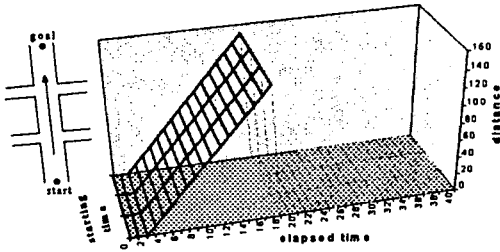
(c) 비연동 제어이고 비정상 상태



(d) 연동 제어이고 비정상 상태



(a) 비연동 제어이고 정상 상태



(b) 연동 제어이고 정상 상태
 그림 13. 시뮬레이션 결과의
 Time-Space Diagram

Diagram

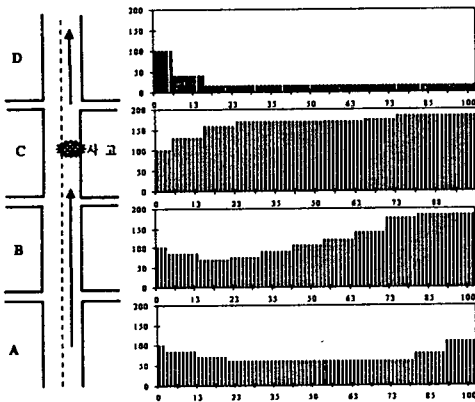


그림 14. 사고시의 혼잡도 파급 그래프

그림 14는 C 지점의 도로에서 사고 발생시 혼잡도의 파급에 따른 차량의 지체 현상이 C로부터 A까지 미치는 과정을 보여주고 있다. D 도로는 사고가 발생한 C도로로부터 차량 진입이 적어지므로 도로가 한산한 상태가 되며, C에서의 도로는 거의 포화 상태가 되어감을 보여주며, 그 여파로 B도로도 점차 차량이 증가해 감을 보여주고 있다.

5.2 고속도로 교통 흐름 분석

Cell space 모델링 접근 방법의 예로서, 도로

를 10개의 cell space 모델 (R-0 ~ R-9) 로 나선 고속도로 교통 흐름 분석에 대한 시험을 진행한다. 시뮬레이션은 다음과 같은 시나리오를 가지고 진행된다: (1) Event1: 고속도로상의 모든 cell들은 교통 혼잡도가 보통인 상태 (normal) 로 초기화한다. 교통량은 start인 R-0에서부터 줄어들기 시작 한다 (rush-hour가 풀린 경우로 생각한다); (2) Event2: 교통사고가 ending cell (R-9) 에서 발생한 상황이다; (3) Event3: 마지막으로 사고가 해결된 상태이다. 그림 15는 Event1 ~ Event3까지의 시뮬레이션 결과인 time-capacity diagram을 나타내주고 있고, 시간의 흐름에 따라 표현한 것이다. 각 그래프의 x축은 elapsed time을 나타내며, y축은 차량의 대수를 나타낸다. 동일한 행의 그래프는 도로의 한 지점에서 연속된 시간의 흐름에 따른 차량 대수의 변화를 나타내고, 각 열의 그래프들은 동일한 시간에 존재하는 도로 각 지점의 차량 대수를 나타낸다. 그림 15의 y축에 보이는 # car (number of cars) 에서와 같이 모든 cell은 80대의 차량으로 초기화되어 있다가 start로부터 차량이 천천히 감소되어 교통의 혼잡도는 (50 time이 지난 후) 감소되기 시작한다. 이 효과는 starting cell (R-0) 로부터 ending cell (R-9) 로 앞으로 전진하는 방식으로 파급되어진다. 점차로 모든 도로에 차량들이 적어져 한산해진 상태를 경과 시간 50 ~ 550구간에서 볼 수 있다. Event2에서 (550 time이 지난 후) 차량들은 R-9로부터 증가되기 시작한다. 이 상태는 R-9 도로에서 어떤 사고가 발생했을 경우를 나타낸 것이다. 사고 발생으로 인해 R-9로부터 빠져 나가는 차량들이 줄어들어 도로에 차량이 쌓이게 되고 점점 R-0로 영향이 미친다. 파급 효과는 R-9로부터 R-0으로 뒤로 영향이 전파되는 방식으로 파급되어진다. 모든 도로가 점차 차량으로 가득 차 포화 상태가 되고 있음을 볼

수 있다. 각 cell내의 차량들은 Event3이 시작될 때 (1900 time이 지난 후) R-9로부터 R-0방향으로 영향을 미치는 방식으로 감소되기 시작한다. 즉, 사고가 풀려서 R-9로부터 차량이 빠져 나감에따라 점차 R-9로부터 뒤로 영향이 미쳐 도로가 한산한 상태가 됨을 알 수 있다. 이처럼 차량이 줄어드는 경우 도로상에서의 파급 효과와 고속도로상에서 사고가 발생했을 경우 혼잡도의 파급 효과를 명백히 분석해 볼 수 있다.

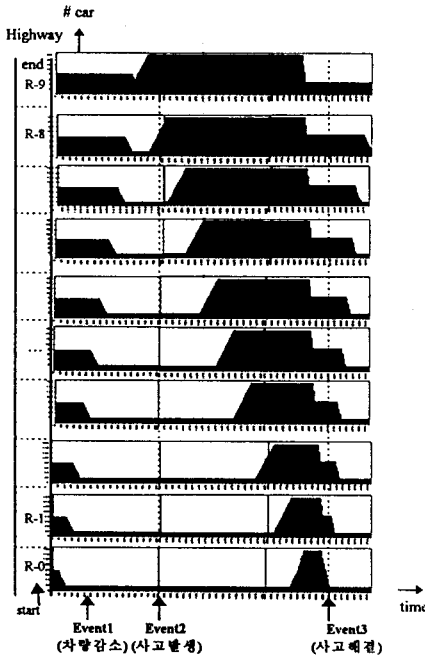


그림 15. 시뮬레이션 결과의 Time-Capacity Diagram

5.3 Symbolic DEVS를 이용한 신호 제어 방식 분석

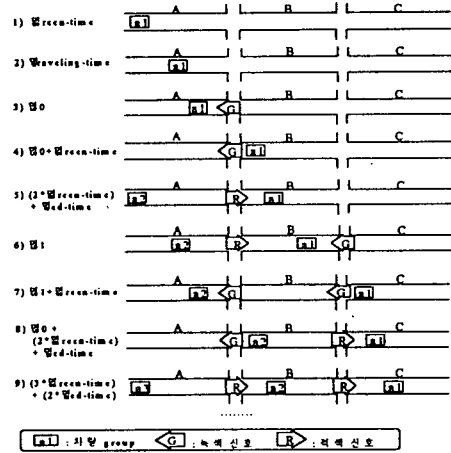
그림 10에서와 같이 2개의 교차로를 가지며, 단방향성을 가지는 도로망을 고려해 보겠다. T-ROAD는 GENR나 CROSS에서 신호를 받은 차량들이 운행하는 개념적 도로 모델이며, W-

ROAD는 신호 받기를 대기하는 차량들이 있는 개념적 도로 모델이다. 5.1절의 주/간선 도로 교통망의 사례 연구와는 달리 여기서는 신호 제어 정책에 대해서는 고려하지 않는다. 4장에서 설명한 바와 같이 Symbolic DEVS 시뮬레이션은 모든 가능한 시간 궤적을 자동 생성해 주므로 각 교차로의 지연 시간 (offset time or delay time) 은 고려하지 않아도 되기 때문이다. 여기서 초점을 두어야 하는 것은 최적의 시간 관계를 찾아내는 것이다. 그러므로, 본 응용 사례를 통해 분석하고자 하는 goal은 신호를 받은 차량이 다음의 교차로에서도 기다림 없이 다시 신호를 받아 운행 할 수 있는 상태로 정의할 수 있다.

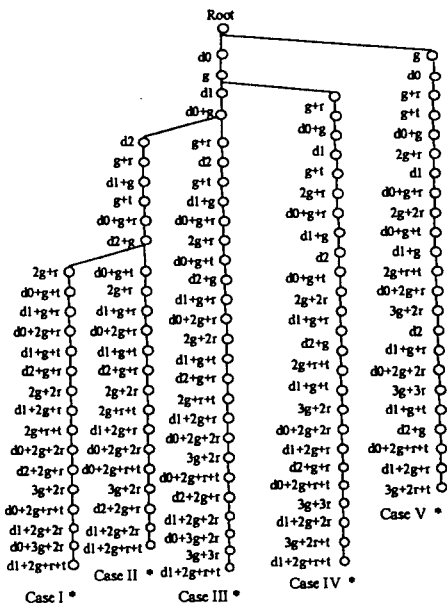
그림 16 (a)는 Symbolic 시뮬레이션을 통해 생성된 goal 궤적 트리를 나타내는데, leaf에 표시된 *는 goal 조건을 만족시키는 궤적을 의미한다. 'green-time, 'red-time은 CROSS와 W-ROAD 사이의 시간 관계로 CROSS로부터 신호를 받은 W-ROAD는 'green-time동안 차들을 앞의 T-ROAD로 보낸다. 'red-time 후 CROSS는 다시 신호를 보낸다. 이 'green-time과 red-time을 더한 것이 여기서의 cycle time이 된다. W-ROAD로부터 차량을 받은 T-ROAD는 traveling-time동안 T-ROAD에서 주행을 하다 traveling-time이 지난 후 W-ROAD로 들어가게 된다. CROSS1은 'd0의 delay time 후 W-ROAD에게 신호를 보내고, CROSS2는 'd1의 delay time 후에, TRANSD는 d2의 delay time 후에 W-ROAD에게 신호를 보낸다. 이 시뮬레이션에서는 각 도로상에 있는 차량들은 단위 시간당 지날 수 있는 차량의 수보다 작은 상태로 가정을 한다. 즉, $a1-num < passing-rate * 'green-time$, $a2-num < passing-rate * 'green-time$, $a3-num < passing-rate * 'green-time$ 의 차량 수에 제한을 갖는다. 그림 16 (a)의 5가지

경우 모두 goal (신호를 받은 차량이 다음의 교차로에서 기다림 없이 또 신호를 받아 운행할 수 있는 상태) 을 만족하는 경우이다.

최적의 goal 조건을 만족시키는 궤적 (Case V) 을 보면, “green-time < ‘traveling-time, ‘d0 < ‘green-time + ‘red-time, ‘d1 < ‘d0 + ‘green-time + ‘red-time, ‘d2 < ‘d1 + ‘green-time + ‘red-time, 3* green-time + 3* red-time < ‘d1 + ‘green-time + ‘traveling-time, ‘d0 + ‘traveling-time < ‘d1, ‘d1 + traveling-time < d2, d1 < ‘green-time + ‘red-time + ‘traveling-time’ 의 timing constraint를 갖게 됨을 알 수 있다. 즉, delay time (‘d0, ‘d1, ‘d2) 은 ‘traveling-time에 비례해서, 하지만 cycle time보다는 작은 값을 갖게 될 때 운행중인 차량들이 다

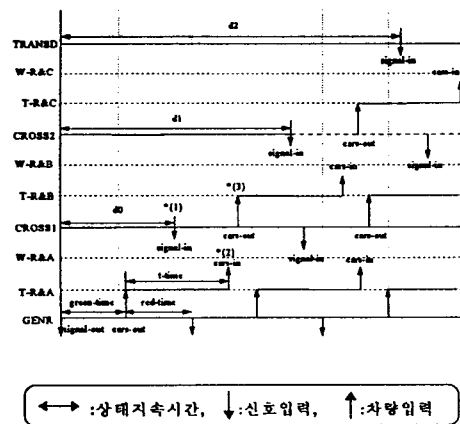


(b) 시간 관계 (Case V)



d0 : cross1 의 delay time
 d1 : cross2 의 delay time
 d2 : Transducer 의 delay time
 g : green-time
 r : red-time
 t : traveling-time

(a) 생성된 시뮬레이션 goal 궤적 트리



(c) 시간에 대한 차량 흐름 개념도 (Case V)

그림 16. 도로 교통망의 Symbolic 시뮬레이션

음 교차로에서도 신호를 받고 바로 빠져 나갈 수 있는 (기다림이 가장 적은) 상태임을 알 수 있다. 그림 16 (b)는 Case V의 시간 관계를 보여주고 있다.

* (1), * (2), * (3)으로 표시된 부분에서처럼 CROSS로부터 signal을 받은 후 (* (1) 로 표시), * (2) 와 같이 T-ROAD에서 W-ROAD로 보내

진 차량들이 별 지연이 없이 *(3)처럼 cars-out 되는 것을 볼 수 있다. 여기서, *(2)와 *(3) 사이의 시간의 지연은 극히 작다. 그림 16 (c)는 Case V의 경우 도로상에 나타날 수 있는 상황들을 symbolic 시간대별로 도식화하고 있다. 1)에서 'green-time이 지난 후 GENR로부터 A도로에 a1의 차량이 들어오고, 그 후 2)처럼 'traveling-time동안 A도로를 주행한다. 'd0의 delay time이 지난 후 A도로에 녹색 신호가 들어오고, 'd0 + 'green-time 후 A도로를 주행하고 있던 차량들이 기다림 없이 교차로를 통과한다. 5)에서는 다시 GENR로부터 a2를 A도로로 보내는 시간 관계를 보여주고, 6)의 d1이라는 delay time이후에 두번째 교차로가 B도로에 녹색 신호를 보내고, B도로를 주행하고 있던 a1 차량이 'd1 + green-time 후 대기없이 바로 교차로를 통과한다. 8)의 'd0 + (2*'green-time) + 'red-time은 A도로를 주행하고 있던 a2차량이 대기없이 교차로를 통과하는 시간 관계를 보여주고, A도로에 a3 차량이 들어온다 (3*'green-time + 2*'red-time). 'd2의 delay time 후 TRANSD로부터 C도로에 녹색 신호가 보내지고, 'd1 + 'green-time + 'red-time, d0 + (2*'green-time) + (2*'red-time) 시간 관계는 B, A도로에 각각 녹색 신호가 보내지는 시간 관계를 보여준다. 그 후 C도로에 있던 차량들 (a3) 이 TRANSD를 기다림 없이 통과하고, B도로에 있던 a2가 두번째 교차로를 통과한다. 위의 그림 16 (c)에서와 같이 초기 조건으로 W-ROAD에 있는 차량의 수가 작고, GENR로부터 들어오는 차량의 수도 passing-rate* 'green-time보다 작을 경우 goal 궤적 트리로부터 생성된 시간 관계는 신호를 받은 차량이 다음의 교차로에서 기다림 없이 또 신호를 받아 운행할 수 있는 상태의 최적 시간 관계를 가지는 신호 제어 방법임을 알 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 교통 흐름 분석에 대한 이산 사건 모델링 및 시물레이션 기법에 대해서 논의하였다. 이 기법은 ATMS나 ATIS의 관점에서 신호 제어 정책을 평가하고, 시물레이션에 의해서 정보를 예측하는데 적합한 수단을 제공하였다. 제안된 모델링 방법을 통해 1) 각종 신호 제어 방식 (연동/비연동), 교통 상황 (사건의 유/무), 교통 흐름 특성 (교통량의 많고/적음)에 따른 교통 흐름을 비교, 분석, 2) 도로상에서 각종 사고 발생 등에 따른 교통 혼잡의 파급 효과, 3) Symbolic DEVS 시물레이션을 바탕으로 최적의 시간 관계를 가지는 신호 등 제어 방식의 발견 등의 사례 연구를 통하여 그 타당성 및 적용성을 입증하였다. 본 연구는 기존의 접근 방법과는 달리 1) 복잡한 도로 교통망의 구조적 표현이 용이하며, 2) 이산 사건 모델링 기법을 이용함으로써 도로 교통망의 동역학적이고 기호적인 모델링이 가능하며, 3) 객체 지향을 기반으로 계층 구조적이며 모듈화된 소프트웨어 환경을 통한 모델의 재사용성, 독립적 테스트성 및 확장성을 제공하며, 4) 미시적인 접근 방법뿐 아니라 거시적인 접근 방법을 제공하고, 5) 신호 제어 방식을 반영하고, 6) 정상/비정상시의 상태의 혼잡도 파급에 의한 교통 흐름 예측이 가능하다는 특징을 갖는다.

앞으로 Symbolic DEVS를 이용한 모델링에 있어서, 시간 관계뿐 아니라 차량 대수의 symbol화를 통해 좀 더 정확한 도로에서의 차량의 증,감에 대한 분석을 위한 연구가 계속되어야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 하 동익, 오 영태, 정 준하, 도시 가로망시설 운영 효율 평가를 위한 모의 실험 모형 개발, 대한교통학회지, 13권 1호, 1995, pp. 185--203.
- [4] B. P. Zeigler, Object-Oriented Simulation with Hierarchical, Modular Models: Intelligent Agents and Endomorphic Systems, Academic Press, 1990.
- [5] S. D. Chi, J. O. Lee, Y. K. Kim, Discrete Event Modeling and Simulation for Traffic Flow Analysis, Proc. of IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics Conf., Canada, Oct. 1995.
- [6] Manual, Traffic Flow Management Forecasting System, 1995.
- [7] B. P. Zeigler, Multifaceted Modelling and Discrete Event Simulation, Academic Press, 1984.
- [8] B. P. Zeigler, DEVS Representation of Dynamical Systems: Event-Based Intelligent Control, Proc. of IEEE, Vol. 77, No. 1, Jan. 1989, pp. 72--80.
- [9] B. P. Zeigler, C. J. Luh, Abstracting Event-Based Control Models for High Autonomy Systems, IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 23, No. 1, January/February, 1993.
- [10] B. P. Zeigler, S. D. Chi, Symbolic Discrete Event System Specification, IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Dec, 1992, pp. 1428--1443.
- [11] S. D. Chi, Hierarchical Model-Based Diagnosis for High Autonomy Systems, Jour. of Intelligent Robotics Systems, 1994, pp. 193--207.
- [12] Highway Capacity Manual, Transportation Research Board Special Report 209, 1985.
- [13] H. M. S. O, Traffic Signals, Road Research Technical Paper No. 56.
- [14] M.E.Ben-Akita, H.N.Koutsopoulos, R.G.Mishalani, and Q.Yang, "Integrated Simulation Framework for Evaluating Dynamic Traffic Management Systems", Proc. 1st Conf. on Application of Transport Telematics and IVHS, Paris, France, Dec., 1994.