

# 교통관리 및 정보제공시스템 평가를 위한 모의실험모형에 관한 연구

## Development of a Traffic Simulator for Evaluating the Traffic Management and Information System

### 정 경 옥

(교통개발연구원, 국가교통DB센터, 수습책임연구원)

---

#### 목 차

---

- |                       |                     |
|-----------------------|---------------------|
| I. 서론                 | III. 모의실험모형의 구현     |
| 1. 연구의 배경 및 목적        | 1. 구현알고리즘 및 적용모수    |
| 2. 연구의 범위 및 전제        | 2. 모의실험 프로그램        |
| II. 시스템 구성요소 및 부모형 구축 | IV. 모형의 검증 및 적용     |
| 1. 주요 구성요소 및 부모형 설정   | 1. 통행시간추정 검증        |
| 2. 차두시간분포             | 2. 교통정보제공 효과분석 적용사례 |
| 3. 차량추종모형             | V. 결론 및 향후연구과제      |
| 4. 단속류를 고려한 감가속 모형    |                     |
| 5. 차로변경모형             | 참고문헌                |
| 6. 교통정보제공과 경로선택       |                     |
| 7. 운전자 및 차량특성         |                     |
- 

#### 요 약

---

본 논문은 ATMS와 ATIS에서 요구되는 교통관리 및 정보제공의 효과분석을 위해, 운전자의 주행 및 경로선택 의사결정과 교통제어에 대한 반응등 운전자 행태를 모의실험에 반영함으로써 교통시스템의 실시간 특성을 모사할 수 있는 모형을 구축하고 이를 기반으로 하는 미시적 교통 모의실험기를 개발하는 것을 목적으로 하였다.

본 연구에서는 운전자, 차량, 교통망, 검지 및 신호시스템, 교통정보제공시스템 등을 교통시스템의 주요 구성요소로 설정하였으며 운전자 및 차량특성, 차두시간분포와 차량발생모형, 차량주행모형, 차로변경 및 간격수락모형, 경로선택모형을 주요모의실험모형을 구성하는 부모형으로 결정하였다. 따라서 본 논문에서는 각각의 부모형들에 대한 최근의 연구결과들을 검토하고, 현실모사 능력과 함께 다른 부모형들과의 연계, 모의실험기의 구현상에서의 적합성 등을 고려하여 적정모형의 선정 및 수정, 새로운 부모형의 구축을 수행하였다. 구축된 부모형을 통합하여 교통 모의실험기를 개발하였으며 구축된 모형의 타당성 및 적용성 검토를 위해 현장자료 및 가상자료를 이용한 검증을 수행하였다. 검증결과 모형의 목적인 교통제어 및 정보제공등의 시스템 대안의 평가에 이용 가능한 것으로 나타났다. 또한 본 논문의 연구결과는 교통제어 및 정보제공전략 대안의 평가뿐만 아니라 차량추종 및 차로변경 등의 미시적 교통모형 연구, 동적기준점 통행량 추정, 동적통행배정의 연구에도 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문의 연구모형은 현단계에서는 현실의 모사 및 분석을 위한 도구보다는 새로운 대안들간의 비교평가를 위한 도구로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 이에 따라 현실모사의 정확도를 확보하기 위한 검증 및 개선이 필요할 것이며, 각 부모형들에 대한 지속적인 연구와 새롭게 발표되는 연구결과를 수용한 지속적인 개발이 필요할 것이다.

---

# 1. 서론

## 1. 연구의 배경 및 목적

최근 지능형교통체계(ITS)의 추진에 따라 첨단교통관리체계(ATMS) 및 첨단교통정보제공체계(ATIS)의 시스템 대안에 대한 분석·평가 요구가 증가하고 있으며, 교통모의실험모형이 이를 가능케 하는 주요 대안 중의 하나로 고려되고 있다. 이에 따라 ITS 대안의 분석 및 평가에 요구되는 기능을 충족시키기 위한 여러 연구결과가 발표되고 몇몇 모형은 이미 상용화되어 있으나, 아직 대다수의 경우 적용상의 한계가 있으며 충분한 검증 및 평가를 통해 범용으로 이용되는 모형은 아직 없는 상황이다. 많은 모형들 특히, 상용화된 모형의 경우 내부 모형 및 알고리즘 등에 대한 정보가 많지 않아, 상세한 입력자료를 바탕으로 시스템 개별요소들의 상호작용을 모사하는 미시적 모의실험모형의 특성에 비추어볼 때, 적정 모수들을 적용하여 정밀한 분석을 하기는 어려운 실정이다. 또한, 모의실험모형을 구성하는 부모형에 관한 연구들도 다른 부모형들과의 연계와 모의실험모형의 전체수행과정을 고려하지 못한 경우가 많으며, 각 부모형별로 아직 일반적으로 인정되는 모형이 없고 지속적인 연구가 진행중인 상황이다.

최근 미국 FHWA는 새로운 교통모의실험모형의 개발을 위한 NGSIM 계획을 추진하고 있다. NGSIM계획에서는 다수단(multi-modal) 통행자들과 차량의 이동과 상호작용, 이들과 교통제어장치, 혼잡등과의 상호작용을 모사할 행태알고리즘의 개발을 목표로 하고 있다. 이 계획에서는 차로변경, 교통제어장치에 대한 반응등의 행태모형과 알고리즘개발, 검증을 위한 현장자료확보, 관련 내용의 문서화 세 가지를 세부 목표로 설정하고 있다.

이에 따라 본 연구는 운전자의 주행 및 경로선택 행태를 내부모형들간의 연계를 고려한 의사결정의 관점에서 모형화 하고 교통관리 및 정보제공의 영향을 반영할 수 있는 미시적 교통모의실험기를 개발하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 연구의 범위 및 전제

운전자의 주행 및 경로선택 행태는 운전자의 의사결정이라는 관점에서 모형화한다. 운전자의 주행행태는 자유주행, 차량추종, 차로변경, 신호 및 교차로에서의 반응등을 포함한 개별차량의 주행으로 모형화하며 경로선택행태는 교통정보제공하에서 통행자의 출발전 경로선택 및 주행중 경로전환행태를 통해 구현한다.

본 연구에서는 구축된 모형의 검증 및 적용성 평가를 위해 교통모의실험기를 개발한다. 이 모의실험기는 개별차량을 기본단위로 하는 미시적 모의실험모형, 시간간격(time step)에 따라 시스템 상태를 갱신하는 이산시간 모의실험모형으로 개발한다.

정보제공매체를 통해 통행자에게 전달되는 정보는 실시간 정보만을 대상으로 하며 예측정보의 제공은 고려하지 않는다. 이는 현재까지 적절한 예측정보 제공모형이 개발되지 않은 상태이기 때문이다.

모의실험모형의 중요 입력 요소인 시간대별 기종점 통행량(OD)은 주어지는 것으로 가정한다. 또한 차량단위의 기종점 통행량이 주어지는 것으로 가정하여 통행수단선택 및 수단간 전환은 고려하지 않는다.

본 연구의 모의실험모형은 offline 분석을 위한 도구로 개발하며 실시간(online) 운영을 위한 고려는 하지 않는다.

## II. 시스템 구성요소 및 부모형 구축

모의실험모형의 구축에서 가장 먼저 해야 할 일은 모형화의 목적에 따라 모사하고자 하는 실제 시스템의 주요 구성요소를 추출하고 각 구성요소들의 특성과 행동 그리고 구성요소들 간의 상호작용을 결정하는 것이다. 본 장에서는 모의실험의 관점에서 교통시스템의 주요 구성요소를 추출하고, 이들 구성요소를 통한 교통시스템의 모형화에 필요한 부모형들을 규정하며 각각의 부모형을 구축한다.

부모형의 구축에 있어서는 기존 연구결과에 대한 검토를 토대로, 현실모사 상세도 및 정확도, 정산해야할 모수의 수와 정산난이도, 모형 및 모수의 전이성, 모형 구현의 복잡도 및 필요 연산량, 부모형들간의 상관관계 등을 고려하였다. 또한 개별 부모형의 특성외에 다른 부모형들과의 연계, 모의실험모형 구현에의 적합성 등도 고려하여 각각의 부모형별로 기존 연구를 검토하고, 기존 모형을 도입 및 수정하거나 새로운 모형을 구축하였다.

### 1. 교통시스템의 주요 구성 요소 및 부모형 설정

본 연구에서 구현하고자하는 모의실험모형은 개별차량을 기본단위로 하는 미시적 교통모의실험모형이므로 운전자와 차량, 도로와 교차로로 표현되는 가로망이 시스템의 기본 구성요소가 된다. 또한 교통관리 및 정보제공의 영향을 모사하기 위해 이들 시스템과 운전자를 연결하는 검지시스템, 신호시스템, 교통정보제공매체를 구성요소로 선정하였다.

본 연구에서는 각 상황별로 운전자의 의사결정행태를 모사하는 부모형을 구축하고 이들을 통합하여 모의실험기를 개발한다. 이를 위해 개별차량의 시스템 진입을 모형화하기 위한 차두시간분포 및 차량발생 모형, 자유주행과 차량추종, 교차로 접근시의 주행행태를 포함한 차량주행 모형, 인접차로로의 이동을 모사하는 차로변경 모형, 교통정보제공시의 경로선택 및 경로전환 모형을 운전자의 행태를 포함한 교통시스템 모사를 위해 필요한 부모형으로 선정하였다. 또한 이러한 운전자의 의사결정에 영향을 미치는 운전자 및 차량특성을 추출하여 정리하였다.

### 2 차두시간분포와 차량발생

차두시간분포는 모의실험모형의 차량발생과정에서 개별 차량의 시스템 진입시간을 결정하기 위해 사용된다. 기존 교통모의실험모형에서는 다음과 같은 차두시간 분포모형을 사용하였다.

- UTCS-1 : shifted negative exponential distribution (shifted 1 sec.)
- INTRAS : negative exponential distribution
- CORSIM : Normal, shifted negative exponential, Erlang distribution

차두시간분포의 밀도함수를 보면 평균 및 최빈값이 왼쪽으로 많이 치우쳐 있는 분포로 Pearson Type V 분포와 유사함을 알 수 있다. Law와 Kelton(1991)은 이와 같이 왼쪽으로 치우친 (skew to the right) 분포를 갖는 자료에 대해 Pearson Type V 분포가 다른 분포들보다 적합한 경우가 있었음을 밝히고 있다. 또한 현장자료를 이용한 분석(박상조등(2001))에서 Pearson Type V 분포는 Drew, May 등이 제시한 Pearson Type III 분포나 그 외 다른 분포들보다 뛰어난 적합성을 보였으며 모수를 통한 모형의 조정성도 나은 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서는 Pearson Type V 분포를 기본 차두시간 발생 분포로 결정하고 현

장자료에 기초한 차두시간의 평균과 최빈값간의 관계식을 이용하여 기종점 통행량의 추가적인 입력 없이 차두시간을 발생시키는 방법을 적용한다.

{차두시간분포를 이용해 차두시간이 발생되면 매 차두시간마다 한 대의 차량을 발생시킨다. 이 때, 차두시간분포는 한 차로를 통행하는 차량들의 차두시간 관측값을 나타내는 분포이므로 차두시간의 평균은 차로별 통행발생량이 되어야 한다. 따라서 기점에서 모든 목적지로 출발하는 통행발생량의 합을 통행발생링크의 차로수로 나누어 차로별 발생 통행량을 구하고 이 통행량에 따라 각 차로별로 차량을 발생시킨다.}

### 3. 차량추종 모형

차량추종모형은 차량의 주행이 선행차량의 영향을 받는 제약교통류 상태에서의 감가속도를 결정하는 모형으로 개별차량의 행태를 기본으로 하는 미시적 모의실험모형의 필수적인 모형 중 하나이다.

최장식(1998)은 현장 자료를 이용해 GM모형과 PITT모형<sup>1)</sup>, CARSIM (Benekohal(1986)) 모형에 대한 거시적, 미시적 검증 결과 안정교통류인 경우 세 모형의 적합도가 큰 차이가 없으나 불안정교통류에서는 CARSIM모형의 적합도가 뛰어나며 다양한 교통상황하에서의 안정성도 상대적으로 높은 것으로 나타났음을 제시하였다. 또한 운전자 특성의 반영과 단속류 모사모형 및 차로변경모형과의 연계 그리고 time step 방식의 모의실험에의 적합성 측면에서 가장 적합한 것으로 분석되었다.

CARSIM 차량추종모형은 후행차의 안전과 운행상의 제약조건을 만족시킬 수 있는 가속도 또는 감속도를 결정한다. 이를 위해 매 time step마다 각각의 차량에 대해 아래와 같은 다섯개의 서로 다른 상황 중 가장 적합한 하나를 적용한다. 그리고 감가속도의 크기를 합리적인 범위내로 제한하기 위해 정상감속도와 최대허용감속도를 이용하여 감가속도의 크기를 제한한다.

- A1. 후행차의 속도가 희망속도에 이르지 않았을 때 앞차와 관계없이 대상차량의 현재속도와 차량의 성능에 의해 결정되는 가속도
- A2. 차량이 time step의 끝에서 희망속도에 도달하는데 필요한 감가속도
- A3. 후행차가 정지했다가 출발하는 경우의 가속도
- A4. time step의 끝에서 앞차와 일정한 차두간격을 유지하도록 하는 감가속도
- A5. time step의 끝에서 선행차가 급감속할 경우, 후행차가 정지반응시간 이후에 최대감속도를 적용하여 충돌하지 않을 거리를 유지할 수 있는 감가속도

### 4. 단속류를 고려한 감가속 모형

CARSIM 추종모형은 고속도로의 추종행태 모사를 위한 모형으로 교차로나 신호에 대한 고려는 배제되어 있다. 따라서 다음과 같이 신호와 교차로에서의 회전이동류를 고려하여 모형을 수정한다.

신호교차로로 접근하는 운전자는 자신의 회전방향 차로의 신호를 확인하고 이에 따라 속도를 조절하게 된다. 황색신호일 경우 운전자는 정상감속도로 감속하여 정지선 앞에 정지할 수 있는지의 여부를 판단하고 교차로를 통과할 것인지 정지할 것인지를 결정한다. 적색신호일 경우에는 최대감속도를 기준으로 정지여부를 결정한다.

교차로에서 회전하는 차량은 직진과 같은 속도로 회전할 수 없다. 따라서 교차로에 접근

---

1 INTRAS에 사용된 모형

하는 회전차량은 통행권이 주어지 있는 경우에도 회전에 적합한 수준으로 속도를 조절하게 된다. 특히, 우회전 차량이나 비보호좌회전 차량은 진입하려는 차로의 간격을 수락하는 과정을 거쳐야 한다.

고속도로에서 진출연결로를 통해 본선을 이탈하는 차량은 감속차로 등을 거치면서 연결로의 설계속도에 맞춰 감속을 하게 되며, 가속차로가 없는 진입연결로로 진입하는 차량은 본선의 진입차로의 간격을 수락하는 과정을 거쳐야 한다.

본 연구에서는 CARSIM 추종모형에의 통합을 고려하여, 운전자가 각각의 상황에서 수행한 의사결정에 따라 나타나는 결과가 감가속도로 표현되도록 한다. 차량에 최종적으로 적용되는 감가속도는 상황에 따라 CARSIM 모형에 의해 결정되는 감가속도, 교차로 신호를 고려한 감가속도, 회전이동을 고려한 감가속도, 연결로진입을 고려한 감가속도, 간격수락 과정을 고려한 감가속도를 이용하여 결정한다. 대상 차량에 적용되는 모든 상황이 가속상황인 경우는 모든 경우의 가속도 중 최소값과 최대가속도, 정상가속도 중의 최소값을 최종 가속도로 결정하고, 감속상황이 포함된 경우는 최소값을 감속도로 결정한다.

## 5. 차로변경모형

차로변경은 차로간 주행속도차, 차로이용제한, 경로상 다음링크로의 회전방향과의 일치성 등 다양한 이유에 의해 현재의 주행차로보다 효용이 높은 차로가 존재하여 통행자가 주행차로를 변경하는 것을 말한다. 본 연구에서는 운전자(차량)의 현재 위치 및 상황을 기준으로 다음과 같은 차로변경 상황을 설정하였다.

- ① 선택차로변경 : 절대적인 차로변경의 필요가 없는 상황에서 주행속도 향상 또는 중차량 회피 등의 효용향상을 위해 차로변경을 하는 경우
- ② 필요차로변경 : 최종목표차로에 도달하기 위해 한번 이상의 차로변경이 반드시 필요한 상황에서 목표지점과의 거리가 적극적인 차로변경을 시도해야 하는 범위에 들어와 있을 경우. 이 경우 차로변경 시도가 실패하면서 목표지점과의 거리가 가까워지면 운전자는 어느 정도의 감속을 감수하면서 적당한 간격을 탐색하게 되며, 수락간격도 좁아지는 경향을 보이게 된다.
- ③ 한계차로변경 : 역시 한번 이상의 차로변경이 반드시 필요한 상황에서 목표지점에 근접하여 즉시 차로변경을 해야하는 경우. 혼잡상황일 경우 적당한 차간간격이 발견되지 않으면 들이밀기(nosing)를 시도해야 하는 경우가 된다. 이 때 운전자는 상당한 감속(정지상황까지)을 감수하면서 들이밀기를 시도하며, 목표차로 후행차의 양보에 의해 차로변경을 하게 된다.

본 연구에서는 중차량의 존재여부, 회전하려는 지점까지의 남은거리, 차로의 속도차, 목적차로 후방차량과의 차간거리, 목적차로 전방차량과의 차간거리, 필요차로변경수, 목적차로 선행차량과의 속도차, 목적차로 후행차량과의 속도차, 목적차로 선행차량 또는 대상차량의 중차량 여부를 설명변수로 하는 이항프로빗 모형으로 차로변경 의사결정을 모형화 하였으며 현장수집 자료를 바탕으로 다음과 같은 모수를 추정하였다.

<표 2.1> 선택차로변경 모형식 모수 정산 결과

변 수	모수추정	t값
상수	-0.665	-2.332
선행차량 중차량 여부	0.139	0.520
Lead Gap	0.022	2.152
Lag Gap	0.0512	3.182
목적차로 선행차-대상차 속도비	4.144	3.966
목적차로 후행차-대상차 속도차	-0.211	-3.046
목적차로 선행차량 중차량 여부	-1.400	-2.437
관측 자료수	148	
$L(0)$	-98.11257	
$L(\beta)$	-71.50769	
$-2[L(0)-L(\beta)]$	51.20976	
$\rho^2$	0.2711668	
	9	

<표 2.2> 필요차로변경 모형식 모수 정산 결과

변 수	모수추정	t값
상수	0.800	3.394
Lead Gap	0.021	1.556
Lag Gap	0.003	0.171
목적차로 선행차-대상차 속도비	3.739	3.067
목적차로 후행차-대상차 속도비	-0.775	-0.714
목적차로 선행차량 중차량 여부	-0.395	-0.907
대상차량 중차량 여부	-1.271	-2.064
관측 자료수	202	
$L(0)$	-82.29273	
$L(\beta)$	-72.88604	
$-2[L(0)-L(\beta)]$	16.81338	
$\rho^2$	0.1143076	
	7	

※ Lag Gap의 경우 t값이 작으나, 중요한 설명변수이므로 제외하지 않음

## 6. 교통정보제공과 경로선택

본 연구에서는 교통정보제공매체에 의한 정보제공 환경하에서 통행자의 출발경로선택과 통행중 경로전환 행태를 모형화한다. 통행자의 경로선택을 모형화하는데 필요한 가장 중요한 두 가지 문제는 통행자의 경로선택 의사결정에서 고려할 대안경로집합을 구성하는 것과 구성된 대안경로집합에서 통행자의 선택을 모형화하는 문제이다.

### 1) 경로선택확률 모형

경로선택확률 모형의 구축을 위해 경로대안특성 변수로 통행시간, 지체시간<sup>2)</sup>, 경로길이, 단위길이당 신호교차로수, 회전수, 전용도로비율을 선정하였으며, 선정된 대안특성요소들이 다양하게 분포하고 운전자들의 인지도가 높으며, 주요하게 경합되는 경로가 존재하는 기종점을 조사대상으로 하였다. 해당 경로에 대한 지식이 풍부한 운전자를 대상으로 설문조사를 수행하여 현시선호자료를 구축하였다.

다항로짓모형을 이용하여 분석을 수행한 결과 다음과 같은 모형을 구축하였다.

$$P(k) = \frac{e^{V_k}}{\sum_{n=1}^K e^{V_n}}$$

$P(k)$  : 경로  $k$ 를 선택할 확률

$n$  : 기점  $i$ 에서 종점  $j$ 까지의 가능한 대안경로들의 집합

$n = \{ 1, 2, \dots, K \}$

$V_k$  : 경로  $k$ 의 효용함수

$$V_k = -0.3056 \cdot (\text{지체시간}) - 0.6430 \cdot (\text{회전수}) - 0.0902 \cdot (\text{경로길이})$$

### 2) 대안경로집합의 구성

대안경로집합을 구하는 기존의 방법들은 Scott Ramming(2002)이 지적한대로 현실의 경로를 충분히 반영하지 못하는 문제와 유사경로를 생성하는 문제를 가지고 있다. 이들 방법은 또한 현재의 통행패턴을 고려하지 않으므로 현실의 링크 및 경로통행량, 통행형태와 무관한 '기술적'인 경로들을 생성할 가능성을 안고 있다

본 연구에서는 이러한 인식을 바탕으로 하며, 연산의 효율성 측면도 고려하여 각 기종점 별로 일정한 수의 대안경로집합을 생성하여 경로선택에 적용하는 방법을 사용한다. 또한 경로집합의 생성 과정에서 통행량 수준에 따른 가로망 상태를 고려하기 위해 정적통행배정기법을 이용하여 대안경로집합을 생성한다. 즉, 모의실험에 입력되는 기종점 통행량 또는 기존의 기종점 통행량을 이용한 정적통행배정을 수행하면서 각 반복수행 과정에서 생성되는 최단경로를 저장하여 경로집합을 구성하였다.

최단경로탐색 알고리즘은 미시적 모의실험모형의 특성상 상세한 경로계산이 필요한 점을 감안하여, 신호 및 회전제한, U-Turn, P-Turn 등을 모두 고려할 수 있도록 하기 위해 D'Esopo 알고리즘을 링크에 기반한 최단경로탐색 알고리즘으로 수정하여 사용하였다.

## 7. 운전자 및 차량특성

희망속도(factor) : 본 연구에서 정의하는 희망속도는 운전자가 현재 도로의 설계조건을 기준으로 이상적인 교통조건하에서 도달하고자 하는 최고속도를 말한다. 실제 적용되는 최고속도는 교통조건, 차량성능과 기하구조 조건등에 의해 제한된다. 자유주행모형과 추종모형에서 최고속도 기준으로 사용되며, 차로변경의사결정 과정에서 현재차로에 대한 만족도 등

2 현재의 통행시간과 자유류 상태 통행시간의 차

을 구하는데 사용된다. 설계속도나 제한속도를 기준으로 일정한 범위내에 분포하며, truncated normal 분포나 truncated lognormal 분포로 표현하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

반응시간 : 운전자의 반응시간은 대체로 0.3초 ~ 2.0초 사이에 존재하는 것으로 알려져 있으며, 경계상황과 비경계상황, 가속시와 감속시의 반응시간을 별도로 추정된 연구결과도 제시되고 있다. 본 연구에서는 차량추종모형에서 충돌방지제약을 만족하는 가속도를 산정하는 과정과 출발반응시간 적용과정에서만 사용한다. CARSIM등에서 적용한 출발반응시간은 경계상황의 반응시간 등과 유사하다는 판단으로 같은 반응시간을 적용한다.

수락간격 : 차로변경, 우회전, 비보호좌회전, 고속도로 합류 등에서 운전자가 진입 또는 차로변경을 수행하는데 기준이 되는 차량간격. 대부분의 연구는 고속도로 합류부등에서 용량산정의 기준으로 사용하기 위한 거시적인 연구결과로 대상차로 앞뒤차량 사이 간격을 산정하는 것이다. 그러나 미시 모의실험모형에서는 전방간격(lead), 후방간격(lag)을 동시에 고려할 필요가 있다. 정성봉(1998)의 연구등 이러한 연구결과도 발표되어 있다. 본 연구에서는 명시적으로 수락간격 값을 이용하지는 않고, 차로변경확률 모형의 모수로 전방 및 후방간격을 사용한다. 또한 합류, 회전, 차로변경 차량들의 간격수락여부는 추종모형의 추종규칙을 깨지 않는 간격을 수락하도록 하는 것으로 모형화한다.

정보제공매체소유 여부 : 정보제공의 효과분석을 위해 필요한 특성으로 입력값을 이용하도록 구현한다.

차량특성은 중량대출력비, 차량길이, 최대가속도, 최대감속도, 정상가속도, 정상감속도를 사용한다. 구배를 고려한 최대가속도와 정상가속도 중 작은 값이 추종모형의 가속상한 값이 된다. 최대감속도는 감속도 값의 하한값이 되며 정상감속도는 정상상태 감속도의 하한값으로 사용된다. 그리고 본 모형에서는 정상감속도를 이용하여 신호 및 교차로의 영향범위를 산출한다.

### 3. 모의실험모형의 구현

#### 1. 구현 알고리즘 및 적용모수

##### 1) 운전자 및 차량특성

##### (1) 희망속도

본 연구에서는 최근의 연구자료인 도로교통안전협회(1998)의 조사결과를 이용하여 설계속도를 기준으로 설계속도를 기준으로, truncated normal 분포를 통해 운전자별 희망속도를 결정하였다. 경계값은 설계속도를 기준으로 하한 90%, 상한 135%로 설정하였다. 구배 등 다른 요소들의 영향은 속도의 상한값인 최고속도의 결정에 적용하여 상황에 따라 희망속도를 제한할 수 있도록 한다.



<표 3.1> 도로 설계속도와 평균속도 및 최빈속도 비교

		평균 속도 (km/h)	최빈 속도대 (km/h)	85% 속도 (km/h)	설계 속도	제한 속도	설계속도비(%)		제한속도비(%)	
							평균값	최빈값	평균값	최빈값
경부 고속도로	주간	111.7	110	121.9	100	100	11.70	10.00	11.70	10.00
	야간	114.5	120	126.9	100	100	14.50	20.00	14.50	20.00
중부 고속도로	주간	113.7	110	131.9	120	110	-5.25	-8.3	3.3	0.00
	야간	118.7	120	136.5	120	110	-1.08	0.00	7.91	9.09
서해안 고속도로	주간	108.9	120	129.7	120	100	-9.25	0.00	8.90	20.00
	야간	108.5	120	132.8	120	100	-9.58	0.00	8.50	20.00
판교-구리	주간	107.3	110	128	100	100	7.30	10.00	7.30	10.00
	야간	112.4	110	132.7	100	100	12.40	10.00	12.40	10.00
올림픽대로 (잠실)	주간	96.5	90	108.1	80	80	20.63	12.50	20.63	12.50
	야간	102.8	110	116.5	80	80	28.50	37.50	28.50	37.50
올림픽대로 (성산)	주간	78.9	80	89.7	80	80	-1.37	0.00	-1.37	0.00
	야간	92.2	90	102.1	80	80	15.25	12.50	15.25	12.50
강북도시 고속도로	주간	78.2	80	88.4	80	70	-2.25	0.00	11.71	14.29
	야간	94.3	100	108.4	80	70	17.88	25.00	34.71	42.86
자유로	주간	106.4	100	125.4	80	80	33.00	25.00	33.00	25.00
	야간	134.6	140	159.7	80	80	68.25	75.00	68.25	75.00
국도3호선	주간	83.6	90	99.3	80	60	4.50	12.50	39.33	50.00
	야간	86.5	100	101.6	80	60	8.13	25.00	44.17	66.67
경춘가도	주간	86.5	90	102.7	80	60	8.13	12.50	44.17	50.00
	야간	99	100	118.2	80	60	23.75	25.00	65.00	66.67

(2) 차량성능

본 연구에서 차량의 제원은 한국건설기술연구원(1995)의 자료의 평균값을 기본값으로 사용한다. 차량의 최대 가속도와 최대 감속도는 차량제원에 의해 제시되는 값을 사용하며, 주행시의 가속도는 ITE(1999) 주행속도별 가속도 자료를 수용하여 차량 주행시의 정상가속도의 최대값으로 사용한다. 차량의 정상가감속도는 ITE(1982)의 자료를 이용한다. 그리고 프로그램 작성시 차종 및 차량 제원은 입력을 통해 변경할 수 있도록 한다.

(3) 반응시간

본 연구에서는 본 연구에서 적용하는 차량추종모형의 기초가 되는 CARSIM 모형에서 사용한 제동반응시간을 충돌방지제약식과 출발지체산정에만 사용한다.

<표 3.2> 경계시와 비경계시의 반응시간 (단위 : 초)

구성비 (%)	경계시	비경계시
100	1.50	2.03
98	1.40	1.89
96	1.30	1.76
94	1.20	1.62
90	1.10	1.49
88	1.00	1.35
81	0.90	1.22
72	0.80	1.08
64	0.70	0.95
48	0.60	0.81
20	0.50	0.68
4	0.40	0.54

## 2) Pearson Type V 분포의 차두시간 발생알고리즘

역함수를 갖는 연속확률분포인 경우 0과 1사이의 균일난수를 발생시키고 이를 역함수에 대입하여 원하는 분포를 따르는 난수를 쉽게 발생시킬 수 있으나 Pearson Type V 분포의 경우 역함수를 구하는 것이 불가능하므로 Law와 Kelton(1991)이 제시한 알고리즘을 사용하여 차두시간을 발생시킨다.

조사자료를 바탕으로한 최빈값과 평균간의 관계를 나타내는 회귀식은 다음과 같다.

$$y = -0.0113x^2 + 0.6597x + 0.5195$$

y: 차두시간 최빈값      x: 평균차두시간

## 3) 차로변경 의사결정과정

앞에서 제시한 차로변경 의사결정 기본구조와 선택 및 필요차로변경 모형을 이용하여 <그림 3.1>과 같이 차로변경 의사결정 과정을 구성한다.

## 4) 정보제공시스템과 경로선택 의사결정의 구현

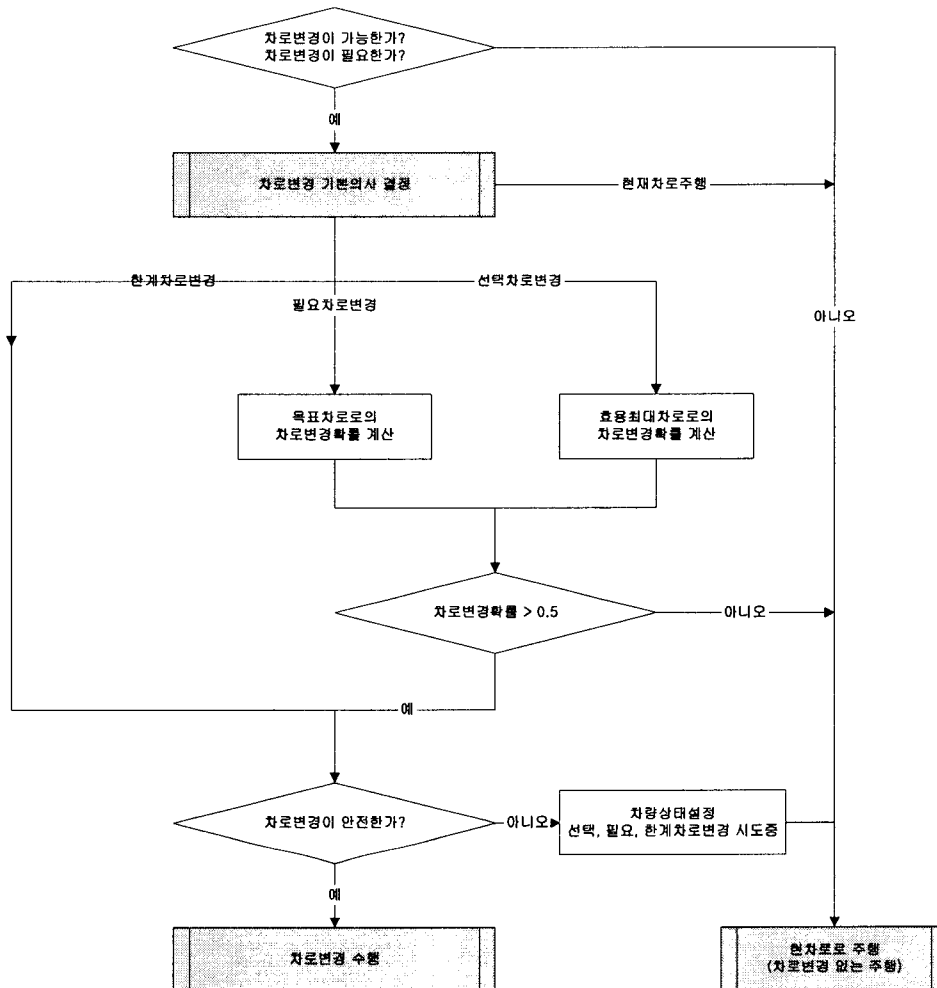
### (1) 출발전 경로선택과정

통행자는 출발전 이용가능한 정보를 활용하여 기종점의 통행에 이용가능한 모든 대안경로집합의 경로중 최대효용(최소비용) 경로를 선택하여 통행을 시작한다. 이 때 출발전 정보제공매체를 이용하는 통행자는 해당매체에서 제공하는 정보를 이용하여 경로비용을 계산하고 그렇지 않은 통행자는 기본통행비용을 이용하여 경로비용을 계산한다.

### (2) 통행중 경로전환과정

통행중 정보제공장치를 이용하는 통행자는 새로운 링크로 진입할 때마다 또는 정해진 시간주기마다 현재 링크에서 종점까지의 대안경로가 있는지를 확인한다. 효율적인 연산을 위해 미리 구성된 대안경로집합을 바탕으로 경로에 속한 각각의 링크에 해당링크의 끝지점(노드)에서 이용할 수 있는 대안경로 정보를 저장한다. 대안경로가 있는 경우 현재위치에서 종점까지의 통행비용을 이용해 최대효용 경로를 찾는다. 최대효용경로가 현재 이용중인 경로와 다를 경우 경로전환확률에 따라 경로전환을 하거나 현재의 경로를 그대로 유지한다.

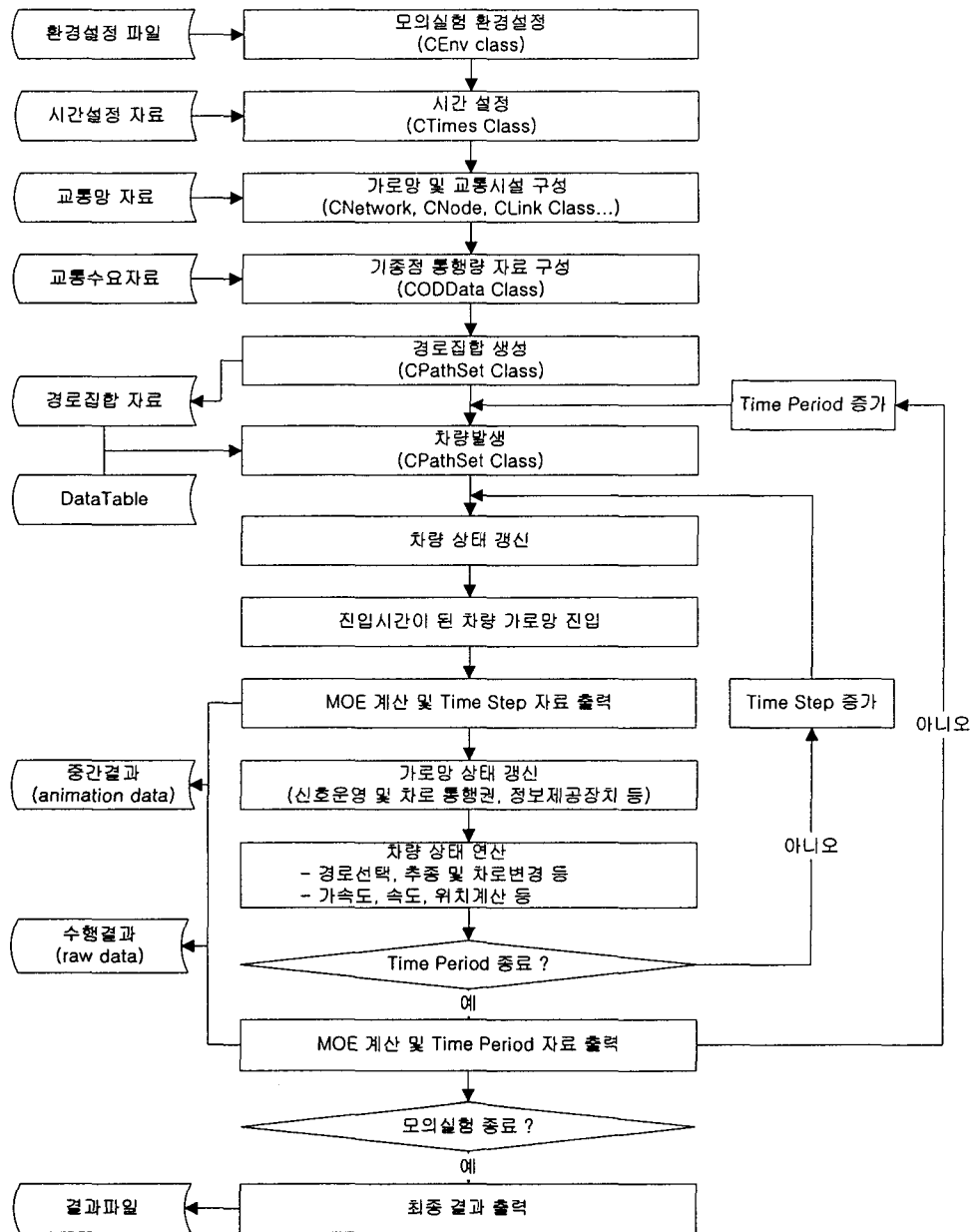
제공정보의 종류 및 정확도 통행자의 순응률, 경로전환의 확률 등은 현재 일반적으로 적용할 만한 모형이 없어 모형화에서 제외하였으나 향후 쉽게 추가할 수 있을 것이다.



<그림 3.1> 차로변경의사결정과정

## 2 모의실험 프로그램

부모형과 시스템 구성요소를 통합한 교통모의실험모형을 설계하고 전산화를 위한 알고리즘을 고안하여 모의실험프로그램을 개발하였다. 운전자, 차량, 교통망, 신호시스템, 교통정보제공시스템을 교통시스템의 주요 객체로 설정하여 객체지향 설계 및 분석기법에 따라 교통시스템 객체의 속성 및 연산을 정의하고 범용언어 중 하나인 C++를 이용하여 모의실험 프로그램을 작성하였다. 프로그램은 기본적으로 time scan 방식을 채택하여 정해진 시간간격마다 시스템 구성요소의 상태변수를 갱신하게 된다. 신호기, 정보제공체계, 차량추종 및 차로변경 의사결정 등은 time step과 무관하게 각각의 주기 및 현시길이, 정보갱신주기, 의사결정주기, 반응시간 등에 의해 상태변경 간격이 제어된다.



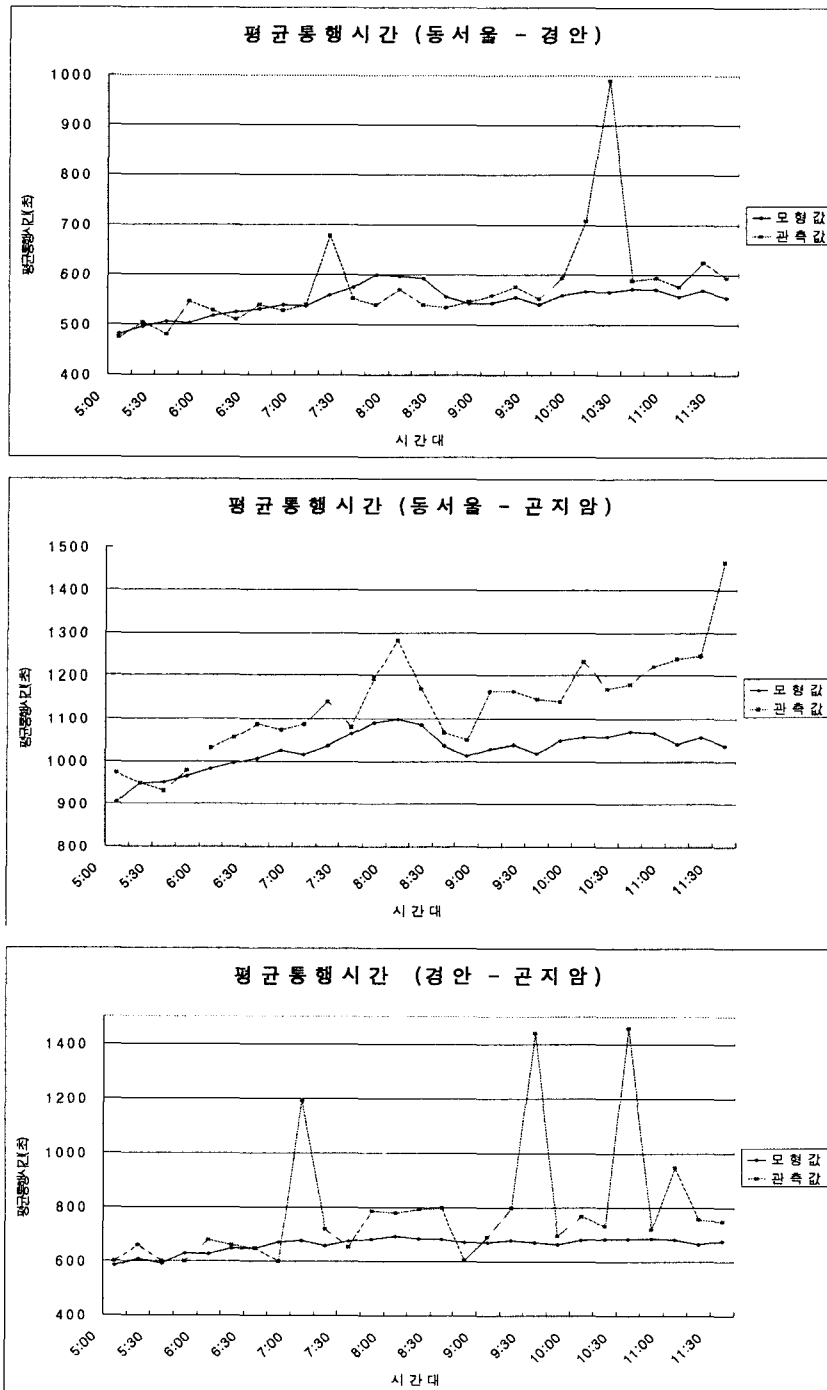
<그림 3.2> 모의실험 프로그램의 기본 흐름도

#### 4. 모형의 검증 및 적용

##### 1. 통행시간 추정 검증

연속류 구간에서의 모의실험모형 검증을 위해 중부고속도로 일부구간의 현장자료를 이용하여 통행시간에 대한 검증을 수행하였다. 대상구간은 일방향 2차로 고속도로인 중부고속도로 동서울-경안-곧지암-호법 구간으로 중부 1, 2, 3터널, 경안 IC의 진출입연결로, 곧지암 IC의 진출연결로, 3곳의 상향구배(3% 이상) 구간이 포함된다. 기종점 통행량은 2001년 5월 31일(목) 5시부터 12시까지의 톨게이트 요금표 기록을 이용해 30분 단위와 15분 단위의 집계자료를 구성하였으며, 검증을 위해 동서울-경안, 동서울-곧지암, 경안-곧지암간의 평균통

행시간 자료를 구축하였다. 가로망은 진출입로와 터널 및 구배구간, 가속 및 감속차로를 각각의 링크로 구분하여 5개의 기종점 노드, 22개의 연결노드, 26개의 링크로 구성하였다. 모의실험은 30분간격의 집계자료와 15분간격의 집계자료에 대해 각각 10회씩 반복수행하였으며, time step은 1초를 적용하였다. 본 연구의 모의실험모형에서 톨게이트를 모사하지 않으므로 관측값과 모형값의 차이를 보정하기 위해 자유류 상태의 모의실험결과와 관측값을 일괄 적용해 진출입 톨게이트로 인한 지체를 보정하였다.



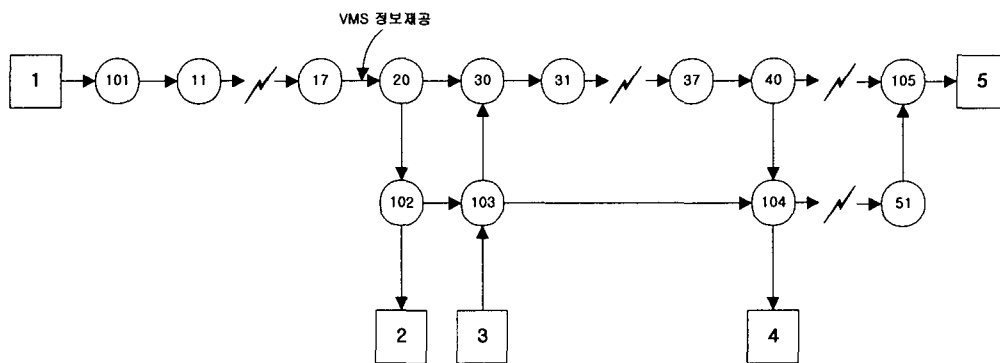
<그림 4.1> 중부고속도로 기종점간 평균통행시간 (15분간격, 10회 반복수행 평균값)

동서울-경안 구간과 경안-곤지암 구간의 결과는 큰 차이를 보이는 특정시간대를 제외하면 모형값이 관측값의 추세를 반영하고 있다. 관측값과 차이를 보이는 부분은 일방향 2차로인 대상지역에서 통상의 지체가 아닌 특수한 상황이 발생하여 관측 통행시간이 크게 나타난 것으로 추정된다. 특히, 경안과 곤지암 구간은 통행량이 많지 않아 이러한 경향이 크게 나타난 것으로 판단된다. 동서울-곤지암 구간은 모형값이 관측값과 상대적으로 많은 차이를 보이고 있다. 이러한 차이의 일부는 톨게이트에서의 지체를 정확히 모사하지 않고 상수값을 적용하여 통행량에 따라 증가되는 톨게이트 지체를 반영하지 못했기 때문인 것으로 판단된다.

전체적으로 모의실험모형의 수행결과가 평균적인 상황은 유사하게 모사하고 있으나, 특수 상황은 모사하지 못함을 알 수 있다.

## 2 교통정보제공 효과분석 적용사례

교통정보제공 효과분석에의 적용성 검토를 위해 앞의 통행시간 추정 검증에서 사용했던 중부고속도로 가로망에 중부고속도로와 평행한 대안경로가 있는 경우를 가정하여 <그림>과 같이 가상 가로망을 구성하였다.



<그림 4.2> 교통정보제공 효과분석을 위한 가로망도

그림에서 102번 노드에서 105번 노드까지 연결되는 대안경로는 본선의 경쟁경로가 될 수 있도록 설계속도 90km/h의 2차로 도로로 설정하였다.

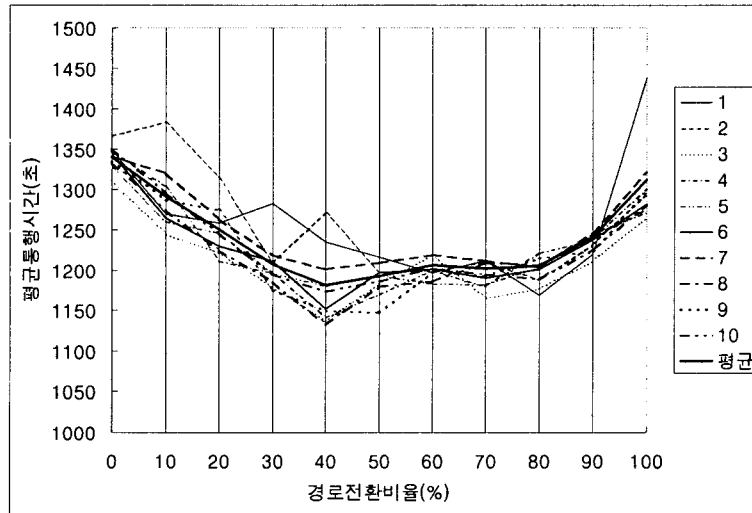
정보제공의 효과 분석을 위해 31번 노드와 37번 노드 중간의 링크에서 15분간 두개의 차량이 폐쇄되고 이후 45분간 한개의 차량이 폐쇄되는 유고가 발생하는 상황을 설정하였다. 전체 분석시간은 3시간으로 하였으며, 유고는 1시간이 지난 시점에 발생하는 것으로 가정하였다. 유고가 발생한 경우 17번 노드와 20번 노드를 연결하는 링크 중간에 위치한 VMS에서 유고발생 정보를 제공하여 1번 기점에서 출발하여 4번 및 5번 종점으로 향하는 통행에 대해 대안경로로 전환할 수 있도록 하였다.

모의실험은 1초의 time step을 적용하여 수행하였으며 본선으로 통행하려던 통행자 중 VMS의 유고정보에 따라 대안경로로 경로를 전환하는 통행자의 비율을 0%부터 100%까지 변화시키면서 경로전환의 영향을 분석하였다

모의실험 결과 평균적으로 경로전환 비율이 0%에서 40%까지 증가하면서 평균통행시간은 감소하는 것으로 나타나 경로전환으로 인한 시스템 효율 개선의 효과를 모사하고 있음을

알 수 있다. 이후 전환비율 80% 정도까지는 완만한 통행시간 증가를 보이고 전환비율 90% 부터는 통행시간이 상대적으로 크게 증가하는 것으로 나타나 과도한 경로전환의 역효과를 반영하고 있다.

사례 분석 결과 경로전환 비율에 따른 정보제공의 효과 변화가 기대했던 경향성을 나타내고 있어 본 연구의 모의실험모형이 이러한 교통정보제공에 따른 경로전환의 효과를 모사할 수 있는 것으로 판단된다.



<그림 4.3> 경로전환 비율에 따른 평균통행시간 변화

## 5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구는 지능형교통체계의 ATMS와 ATIS에서 요구되는 교통제어 및 정보제공의 효과 및 대안분석을 위해, 운전자의 주행 및 경로선택 의사결정과 교통제어 및 정보제공에 대한 반응등 운전자 행태를 중심으로 교통시스템을 모사할 수 있는 모의실험모형을 구축하고 이를 이용한 미시적 교통모의실험기를 개발하는 것을 목적으로 하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

운전자의 의사결정이라는 관점에서의 교통시스템에 대한 분석을 통해 운전자 및 차량, 가로망, 검지 및 신호시스템, 교통정보제공매체 등을 교통시스템의 주요 구성요소로 선정하여 그 속성 및 연산을 정의하였다. 또한 운전자 및 차량특성, 차두시간분포와 차량발생모형, 차량주행모형, 차로변경 및 간격수락모형, 경로선택모형을 미시적 교통모의실험모형 구현을 위한 부모형으로 설정하였다.

부모형의 구축에 있어서 현실모사 능력과 함께 다른 부모형들과의 연계, 모의실험모형 구현에의 적합성 등을 고려하였으며, 각각의 부모형별로 기존 연구를 검토하고, 기존 모형을 도입 및 수정하거나 새로운 모형을 구축하였다.

객체지향 기법을 적용하여 시스템 구성요소와 부모형을 통합한 교통모의실험모형을 설계하고 전산화를 위한 알고리즘을 고안하여 모의실험기를 개발하였다.

구축한 모의실험모형의 타당성 검토를 위해 중부고속도로 일부구간의 현장자료를 이용해 통행시간에 대한 검증을 수행한 결과 현실의 통행패턴을 모사하는 것으로 나타났다.

교통정보제공 효과 분석에의 적용성 검토를 위해 가상가로망에서 유고발생시 VMS에 의한 정보제공 상황을 설정하여 경로전환비율 변화에 따른 평균통행시간 변화를 분석하였다.

분석 결과 정보제공의 효과 변화가 기대했던 경향성을 보여 경로전환의 효과를 모사하는 것으로 나타났다.

본 연구를 통해 구축한 모형은 기존의 연구결과에서 제시된 모수들을 활용하고, 일부 현장자료를 이용한 모수 추정 및 타당성 검증을 수행하였으나 이는 매우 제한적인 결과이며 현실 모사의 정확도는 판단하기 어렵다. 따라서 현단계의 모형은 현실의 모사 및 분석을 위한 도구보다는 새로운 대안들간의 비교평가를 위한 도구로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 모형의 구성부모형들은 개선의 여지가 많은 모형들로 지속적인 연구와 새롭게 발표되는 연구를 수용한 지속적인 개발이 필요할 것이다.

## 참고문헌

- 서울대학교 공학연구소등, 도로혼잡시 동태적 수단선택 및 교통류 시뮬레이션 모형의 개발, 2001. 5  
최강식, 미시적 모의실험을 위한 추종모형의 비교분석에 관한 연구, 서울대학교 대학원 석사학위 논문, 1998. 2
- 도로교통안전협회, 법정 최고속도 및 차로통행방법 개선방안, 98-17-346, 1998. 12
- Ahmed, K. I., Modeling Driver's Acceleration and Lane Changing Behavior, Sc.D.Thesis, MIT, 1999. 2
- Aycin M. F., Benekohal R. F. Analysis of Stability and Performance of Car-Following Models in Congested Traffic, Transportation Research Board 79th Annual Meeting, 2000
- Benekohal, R. F., Development of a Car-Following Model for Simulation of Traffic Flow and Traffic Wave Studies at Bottlenecks, Ph. D Dissertation, The Ohio State University, 1986
- Gipps, P. G., "A Model for the Structure of Lane-Changing Decision", T.R. Part B, 1986  
ITE, Transportation and Traffic Engineering Handbook, 1982  
ITE, Transportation and Traffic Engineering Handbook, 1999
- Law, A. M. and Kelton, W. D., Simulation Modeling Analysis, McGraw Hill, 1991
- Mandava, Supriya, A Multinomial Probit Model of Driver Gap Acceptance Behavior During Freeway Lane Changing, MS Thesis, UT Austin, 1997
- Mark Brackstone, Mike McDonald, Car-following : A Historical Review, Transportation Research Part F 2, pp.181-196, 1999
- Michael Scott Ramming, Network Knowledge and Route Choice, Ph. D Dissertation, MIT, 2002. 2
- Polydoropoulou, A., Moshe Ben-Akiva, Asad Khattak, and Geoffrey Lauprete, Modeling Revealed and Stated En-Route Travel Response to Advanced Traveler Information Systems, TRR 1537, 1995
- Shlomo Bekhor, Moshe Ben-Akiva, M. Scott Ramming, Estimating Route Choice Models for Large Urban Networks, 9th World Conference on Transport Research, 2001. 7.
- Yang, Q, A Simulation Laboratory for Evaluation of Dynamic Traffic Management Systems, Ph. D Dissertation, MIT, 1997. 6

※ 본 논문은 '98 건설기술연구개발 사업 중 "도로혼잡시 동태적 수단선택 및 교통류 시뮬레이션 모형의 개발" 과제와 '98 ITS 핵심기반기술 개발사업 중 "교통류 평가 기술 개발" 과제의 연구성과를 기초로 한 것이며, 상기 과제에 참여했던 많은 연구진의 연구 결과가 포함되어 있음을 밝힙니다.