연속류 도로의 한국형 모의실험 프로그램 개발
Development of a Traffic Simulation Program for Uninterrupted Traffic Flow Facilities

한국건설기술연구원
최대순

ABSTRACT

The objectives of this study are to analyze, examine characteristics of car-following, lane change in freeway traffic flow and develop a simulation program for freeway traffic flow in Korea. Main results of this study are as follows :

- ▶ Parameters and formulae are obtained after analyzing characteristics of time headway, speed, platoon size, effects of heavy vehicles, car-following, lane change of freeway traffic flow in Korea.
- ▶ The vehicle generation model which uses random number generating method is constructed and variations of speed, according to proportion of heavy vehicles are applied to construction of this model.
- ▶ The car following model based upon Pitt-KLD model is constructed and car-following related parameters based upon field survey data are set.
- ▶ The lane change model based upon gap acceptance rules is constructed and critical gaps, according to driver's type in Korea are set by 10 cases. An empirical model which based on field survey data for probabilities of lane change(PLC) is constructed and this PLC is compared with Markov process.
- ▶ The outputs of a developed simulation program are compared with field survey data of merging area in order to evaluate this program. The result of evaluation is that there is little difference between statistics of the two before merging, but that there are somewhat differences between them of the two after merging.

요지

본 연구의 목적은 1994년과 1995년의 연구 결과를 토대로 고속국도 교통류의 차량 추종, 차선 변경 특성을 현장 조사 자료를 통하여 분석·규명하고, 국내 고속국도의 교통류 특성을 반영할 수 있는 한국형 고속국도 모의실험 모형을 개발하는데 있다. 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

- ▶ 국내 고속국도 교통류의 차두 시간, 속도, 차량군의 크기, 차선 변경, 중차량의 영향 등의 특성을 조사·분석하여 관련 매개변수와 모형식을 도출하였다.
- ▶ 차량 생성 모형은 개별 차량의 차두 시간, 속도를 이용하여 구축하였으며, 중차량의 구성비율에 따른 속도 변화를 연구하여 그 결과를 모형 구축에 응용하였다.
- ▶ 차량 추종 모형은 1995년 연구에서 검증된 PITT-KLD 모형에 기반을 두었으며, 현장 실측 자료를 분석하여 차량 추종과 관련된 매개변수들을 설정하였다.
- ▶ 차선 변경 모형은 기본적으로 간격 수락 모형을 이용하였으며, 차선 변경시 임계 간격을 국내 운전자들의 유형에 따라 10가지로 설정하였다. 차선 변경 확률은 현장 조사 자료를 기초로 한 경험적 모형을 구축하여 산정하며, 마코프 연쇄 기법과도 비교·검토하였다.
- ▶ 개발된 모의실험 모형을 비교·평가하기 위해 고속국도 합류부의 현장 조사 자료와 모의실험 모형을 비교·평가한 결과, 합류 이전 단계에서는 실측치와 모형의 통계량이 어느 정도 유사한 양상을 보이지만 합류 이후 단계에서는 차이를 나타내고 있다.

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

우리 나라 전국 도로망의 79%를 차지하고 있는 연속류 도로의 대표 적인 일반국도와 고속국도는 지역간 통행에 중추적인 역할을 담당하고 있으며, 화물 수송에 있어서도 매우 중요한 위치를 차지하고 있는 사회 간접 자본이다. 1993년 한 해 동안 전국 도로에서 발생한 교통 혼잡 비용은 8조 5,794억원으로 국민 총생산의 3.25%나 되며, 국가 경제력 및 경쟁력 제고의 핵심 요소로 부상하고 있는 물류 비용의 50% 정도가 수송비용으로 추산되고 있다는 점을 고려해 볼 때, 도로를 더욱 효율적이고 효과적으로 관리하고 운영할 수 있는 방안 수립이 시급한 실정이다. 도로의 계획과 기존 도로의 선형 개량, 교통 제어 및 관리 등과 같은 도로 교통 사업을 더욱 효율적으로 시행하기 위해서는 도로에서 발생하는 복잡하고 다양한 교통 현상을 재현하고 이를 체계적으로 검토·분석하는 방법론이 뒷받침되어야 한다. 그에 따라, 실제 교통 흐름의 특성을 구체적으로 모형화하고 각 사업 대안들의 효과를 비교·평가할 수 있는 교통 모의실험 프로그램(Traffic simulation program)의 개발이 꾸준히 요구되어 왔다.

그러나, 이러한 모의실험 프로그램의 역할과 효용성에도 불구하고 이에 관한 국내 연구는 매우 미흡한 실정이다. 우리 나라의 경우 고속국도의 확장과 신설, 2차선 일반국도의 다차선화, 일반국도와 지방도 그리고 군도의 신설 등 도로의 공급이 지속적으로 추진되고 있으나, 이미 공급된 도로와 새로이 공급되는 도로의 효율적 운영, 관리가 여전히 주요 문제로 대두되고 있다. 이와 같은 도로 공급과 운영을 효율적으로 시행하기 위해서는 국내 현실에 적합하지 않은 외국 모형을 단순 적용할 것이 아니라, 국내 도로 교통 상황에 적합한 모형을 개발하여 사용함이 바람직하다.

따라서, 본 연구의 목적은 '연속류 도로의 한국형 모의실험 프로그램 개발' 1단계와 2단계의 연구 결과를 토대로 고속국도의 교통 흐름, 차량 추종, 차선 변경 특성을 현장 조사 자료를 분석하여 규명하고, 국내 고속국도의 특성을 반영할 수 있는 한국형 고속국도 모의실험 모형을 개발하는 데 있다.

1.2 연구의 범위 및 내용

본 연구는 고속국도의 개별 차량을 연구 단위로 하여 운전자의 행태, 차량간의 반응 행태를 분석함으로써 미시적인 고속국도 모의실험 모형을 개발하는 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 부분에 초점을 두고 연구를 수행하였다.

- ▶ 국내 고속도로 교통 흐름의 차두 시간, 속도, 차량군의 크기, 차선 변경, 중차량의 영향 등의 특성을 조사·분석하여 관련 매개 변수와 모형식 도출
- ▶ 차량 생성 모형은 개별 차량의 차두 시간, 속도를 이용하여 차량 분포 모형을 구축하고 난수 발생 기법을 사용하여 진입 구간에서 모의 차량들을 발생시킨다. 중차량 구성비에 따른 속도 변화를 연구하여 모형 구축에 응용
- ▶ 차량 추종 모형은 2단계 연구에서 검증된 Pitt-KLD 모형에 기반을 두고 현장 실측 자료를 분석하여 차량 추종과 관련된 변수들을 설정
- ▶ 차선 변경 모형은 기본적으로 간격 수락 모형을 이용하며 차선 변경의 임계 간격을 국내 운전자들의 유형에 따라 10가지로 설정한다. 차선 변경 확률은 현장 조사 자료를 기초로 한 경험적 모형을 구축하여 산정하며, 마코프 연쇄 기법과 비교·검토

2. 기존 모형 검토 및 프로그램 개발 방향

최근 들어 고속국도의 안전, 용량, 운영 측면의 효율을 증대시키기 위한 많은 노력과 연구가 진행되고 있다. 특히, 현재 교통 분야에서 많은 관심을 나타내고 있는 ITS에서도 도로 운영의 효율성 증대를 위해 평가 모형들이 지속적으로 개발되고 있다. 일반적으로 교통 현상을 분석하기 위한 모형으로는 거시적인 모형과 미시적인 모형이 있으며 각 모형에 따라 장·단점을 지니고 있다.

거시적 모형은 전체 교통 특성을 분석함으로써 미래의 교통 운영 상태를 예측하기 위해 주로 사용되며 개별 차량의 특성을 분석하는 미시적 모형과는 달리 차량군 또는 구간 밀도 등의 분석 지표를 사용한다. 거시적 모형은 교통의 특성을 전체적으로 묶어 사용하기 때문에 미시적 모형보다 정확성은 떨어지나, 모형 내부의 교통 관련 변수들의 상호 관계가 간단 명료하다는 장점이 있다. 반면, 미시적 모형은 세부 사항(개별 속도, 개별 차두 시간, 차선 변경 등)들을 포함하고 있기 때문에 거시적 모형보다는 상당히 정확한 결과를 얻을 수 있으나, 다량의 원시 자료와 비용, 인력이 많이 요구된다. 이와 같은 모형의 특성으로 인해 거시적 모형은 교통 계획이나 최적화 전략에 주로 사용되며, 미시적 모형은 교통 관리와 운영에 주로 사용된다.

표 2.1에서는 거시적 모형과 미시적 모형의 특징을 분리하여 설명하고 있으나 실질적으로 거시적 모형에 대한 연구는 미시적 모형에 기초를 두고 있다. 우리가 알고 있는 거시적 모형인 FREQ도 고속도로 운영과 교통 분석에 사용된 미시적

모형에 기초를 두고 있으며, 교차로 신호 연동화의 최적화 모형인 TRANSYT 역시 단일 교차로 분석 모형에서 출발하였다.

표 2.1 거시적 모형과 미시적 모형의 비교

미시적 모형	거시적 모형
▶ 개개 차량의 상호 관계를 이용 ▶ 개별 차량의 차두 간격, 속도를 이용 ▶ 교통 행태, 차선 변경에 대한 상세연구 ▶ 많은 전산 처리 시간이 요구되며, 차량 주행 패턴에 따른 교통 분석 과정이 복잡하나 정확함 ▶ 일반적으로 교통 관리와 운영에 적합함	▶ 차량군, 도로 구간의 특성을 조사, 이용 ▶ 평균 속도, 밀도, 시간 교통량 등과 같은 평균값을 교통 특성으로 사용 ▶ 행태 분석은 단순화되어 있음 ▶ 미시적 모형에 비해 비용 효과가 크며, 단순한 입력 자료를 사용해도 대안별 비교•평가가 가능함 ▶ 교통 계획 분야에 주로 사용

거시적 모형의 출현은 광범위한 지역이나 구간에 대한 교통 특성의 분석 요구에 따른 결과물이며, FREFLO, FREQ, TRANSYT-7F, PASSER, SOAP 등이 현재 사용되고 있는 대표적인 거시적 모형들이다. 그러나 기존 연구에서도 언급하였듯이 거시적 모형은 도로에서 발생하는 다양한 교통 변화에 대해 직접적이고 충분한 검증과 검정이 어려우며 결국은 미시적인 요소들을 분석해야 거시적인 교통 현상이나 영향을 알 수 있다. 따라서, 지금은 거시적인 요소와 미시적인 요소를 모두 표현할 수 있는 프로그램 개발에 상당한 노력을 기울이고 있는 실정이다.

본 연구에서 추구하는 모형은 미시적 수준에 기초를 두고 있으며, 현장 조사 자료를 이용한 경험적 모형에 확률 추계적 개념을 추가한 분석적 모형으로 구축하였다. 따라서 교통류를 구성하고 있는 개별 차량들의 특성을 조사・분석하여 미시적 모형의 주요 모듈인 차량 생성(Vehicle Generation), 차량 추종(Car Following), 차선 변경(Lane Change) 모듈에 적용하여 프로그램을 개발하였다.

3. 차량 생성

차량 생성(Vehicle Generation) 모듈은 모의실험 대상 구간 중 첫 번째 구간인 진입 구간(Entry link)에서 차량을 발생시키는 역할을 한다. 일반적으로 차량 생성 과정에서 운전자 특성이나 유형, 차종(승용차, 버스, 트럭), 희망 속도, 최대 가속도 등은 무작위로 결정되며 차량 추종 과정을 통해 주행 속도, 위치 등이 조정

된다. 일반적으로 차량을 생성하는 기법에는 차두 간격을 이용하여 이를 함수화하는 방법이 있다. 본 연구에서는 전체 차량의 차두 간격을 이용하는 기법과 차량군의 차두 간격을 이용하는 기법을 비교하여 현장 조사 자료에 보다 근사한 결과를 제시하는 생성 기법을 모듈화하였다.

3.1 전체 차두 간격을 이용한 생성 기법

실생활에서 발생하는 여러 가지 현상들을 수학적 또는 통계·확률적으로 표현하는 데에는 많은 불편과 제약이 따른다. 교통류의 특성을 설명해 주는 차두 간격, 주행 속도, 차량군의 크기 등과 같은 교통 지표들 역시 확률적인 함수로 설명하기에는 한계가 있다. 특히, Poisson 분포나 Exponential 분포와 같이 한 개의 매개변수를 가진 분포들은 다양한 현상을 설명하기가 어렵다. 그러나 Beta 분포, Gamma 분포 등과 같은 2-매개변수 분포들은 복잡하고 다양한 표본들의 분포를 이해하는 데 유용하며, 이러한 분포들로부터 얻어진 결과를 여러 번 운용, 실험하면 실제 상황에 근접한(near real-world) 결과를 보여줄 수 있다는 점이 모의실험의 큰 장점이다.

실측한 차두 간격 자료를 분석해 보면 교통량 범위 (2,000~850 vphpl)에 따라 다소간의 차이는 있으나, 차두 간격 2초 부근에서 확률 밀도 함수 값이 피크를 이루고 있으며, Gamma나 Beta 분포보다는 Lognormal 분포 함수가 이와 같은 피크 현상을 더 잘 표현해 주고 있다.

표 3.1은 최우추정법에 의해 구해진 매개변수 λ, ρ 값을 교통량에 따라 구분해 놓은 것이며, 회귀 분석 결과와 비교한 것이다.

표 3.1 최우추정법에 의한 매개변수의 결정

교통량	λ		ρ	
(vphpl)	최우추정법	회귀 분석	최우추정법	회귀 분석
2000	0.4367	0.4341	0.5104	0.5280
1900	0.4667	0.4741	0.5370	0.5540
1750	0.5425	0.5341	0.5868	0.5930
1500	0.6380	0.6341	0.6605	0.6580
1300	0.7217	0.7141	0.7251	0.7100
1150	0.7547	0.7741	0.8004	0.7490
850	0.9023	0.8941	0.7721	0.8270
R^2	0.9962		0.9190	

따라서, 본 연구의 모의실험 프로그램에서는 최우추정법에 의해 2개의 매개변수를 구하여 차두 간격 분포 곡선의 형태를 만들었으며, 회귀 분석 결과를 이용하여 교통량에 따른 분포 곡선의 변형을 다음과 같이 설정하였다.

$$H(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\rho t}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \lambda}{\rho} \right)^2 \right] \quad \cdots\cdots (3.1)$$

여기서,

$H(t)$ = 고속도로 차두 간격 분포 함수
λ = 1.2341 − 0.4 × (교통량)/1000
ρ = 1.048 − 0.26 × (교통량)/1000

식 3.1을 실제 모의실험에 사용하기 위해서는 개별 차량의 차두 시간을 생성해 주는 방법이 필요하다. 즉, 개별 차두 간격의 난수 발생(generation of random numbers)이 요구된다. 본 연구에서는 Box와 Muller(1958)가 개발한 난수 발생 기법을 사용하여 Lognormal 분포의 성질을 갖는 차두 간격을 생성하였다.

3.2 차량군 간격을 이용한 생성 기법

'연속류 도로의 한국형 모의실험 프로그램 개발'의 1995년 작업 과정에서 얻은 경험으로는 일반국도에서의 차량군 차두 간격 분포가 Shifted negative exponential 분포와 매우 흡사하다는 것이었다. 만약, 고속국도에서 차량군 차두 간격 분포가 Shifted negative exponential 분포를 따르고 차량군의 크기 분포 또한 확률 함수로 표현할 수 있다면 다음과 같은 과정을 통해 진입 구간에서 차량을 생성하게 된다.

- 차량군 간격 분포의 결정 : 차량군의 차두 시간 분포는 음지수 분포 군을 따른다는 것에 긍정적이므로, 차량군의 차두 시간이 결정되면 난수 발생 기법을 사용하여 진입 구간에 자유차나 선두차를 생성한다.
- 차량군 크기 분포의 결정 : 자유차 또는 차량군의 선두차를 생성한 후 차량군의 크기를 결정한다. 생성된 차량이 자유차인 경우에는 차량군의 크기가 한 대이므로 상관이 없으나 만약 차량군 내의 선두차가 생성된 경우에는 몇 대의 추종차들이 선두차를 뒤따르는지를 결정해야 한다.
- 추종차들의 차두 간격 결정 : 차량군 크기가 한 대 이상으로 결정되면 추종차들의 운전자 형태, 차종, 차두 간격이 이 과정에서 결정된다. 일반적으로 추종차들의 차두 간격은 관인 변량의 개념으로 설정되며, 교통량, 차량 추종 과정, 시야 조건 등에 따라 차량군 내 추종차들의 차두 간격이 변한다.

이와 같은 과정을 이용하여 진입 구간에 차량을 발생시키는 기법의 장점은 다음과 같다. 즉, 1) 차량군의 차두 간격(자유차, 차량군 선두차들의 차두 간격)이 대체로 음지수 분포 군의 형태로 표현된다. 2) 차량군내 추종차들의 차두 간격은 일정하게 주어지므로 프로그램 개발자가 추종차들의 분포 함수를 별도로 설정할 필요가 없다. 그러나 차량군을 이용한 차량 생성 기법의 큰 단점은 차량군의 크기를 결정해야 한다는 점이다. 1995년의 연구 결과 차량군의 크기 분포를 확률·추계적으로 표현하기란 매우 어렵다.

진입 구간에 차량을 발생시키기 위해 본 연구에서는 지금까지 설명한 두 가지 기법을 검토하였으며, 실측 결과와 비교해 볼 때 차량군의 차두 분포보다는 전체 차량의 차두 분포가 차량 생성 모듈 개발에 더 효과적이라는 결론을 내렸다.

3.3 속도 발생

속도는 여행 시간과 더불어 도로가 제공하는 서비스의 수준을 직접 표현해 주는 중요한 효과 척도이다. 모의실험 프로그램에 있어 차량의 차두 시간 발생과 함께 진입 구간에서는 생성된 차량에 속도에 대한 특성을 부여한다. 즉, 최대 속도, 최대 가속도, 희망 속도 등의 특성이 차량별, 차선별로 요구된다.

도로에서 차의 속도를 확률 변량이라고 간주하고 이 변량에 대한 분포 특성에 관해 지금까지 많은 연구가 진행되어 왔다. 특히 교통량-속도, 밀도-속도의 관계와 같은 거시적 관점에서 수행한 속도 특성에 관한 연구는 속도 변화가 발생하는 이유를 충분히 설명하지 못하고 있다. 혹자는 속도 분포의 특성을 자유차와 추종차 구성의 변화로 파악하기도 했으나, 이는 수식적인 모형에 의한 접근 방법이며, 모의실험의 진입 구간에서 발생하는 차량에 속도 특성을 부여하기 위해서는 현장 결과를 이용하는 것이 더 간편한 방식이다.

종래의 연구 결과와 국내 경부 고속도로의 현장 조사 결과를 살펴보면 차량들의 속도는 대체로 대수 정규 분포나 정규 분포를 따르고 있다. 2차선 도로의 경우 정체류는 대수 정규 분포, 비정체류는 정규 분포를 따르기도 하나 정규 분포는 대수 정규 분포로도 그 표현이 가능하므로 분포식의 단순화와 일원화를 위해 본 연구에서는 속도 분포식을 다음과 같이 설정하였다.

$$\text{속도 분포} : \frac{1}{\sqrt{2\pi\rho V}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln V-\lambda}{\rho}\right)^{2}\right] \qquad \cdots\cdots (3.2)$$

여기서,

V : 속도(km/h)
ρ : 속도의 표준편차 = 0.1047
λ : 5.1756 − 0.24 × 교통량(vphpl)/1000

4. 차량 추종

차량은 진입 구간에서 생성되어 대상 모의실험 구간을 통과하는 동안 매초 단위로 새로운 속도와 위치가 결정된다. 진입 구간을 진입한 차량이 초기 단계에 갖고 있는 속도는 희망 속도의 최저값 또는 수학적(확률적) 모형에서 발생된 속도값을 지니게 된다. 이후의 실제 주행 속도는 차량 추종 방정식(car-following equation)에 의해 얻어진 가속도 값에 의해 결정된다. 그리고 차량 추종 과정에서 선행차와 추종차간의 차두 간격이 검토되는데, 차두 간격이 너무 작은 경우에는 최소한의 안전 거리를 유지하도록 조정된다. '연속류 도로의 한국형 모의실험 프로그램 개발'에서는 1995년 연구에서 결정된 PITT 차량 추종 모형을 근간으로 하여 차량 추종 모듈을 수정하여 사용하였다.

4.1 추종 변수(Car-following Parameters)

PITT 모형의 차량 추종 변수는 구간의 용량 특성을 나타내는 $K_{p,m}$과 운전자의 반응도를 표현하는 $K_{p,d}$로 구성되어 있다. $K_{p,d}$와 $K_{p,m}$ 값을 결정하는 방법은 1995년 연구에 자세히 설명되어 있으므로 여기서는 고속도로 현장에서 수집된 차두 간격의 실측 자료를 이용한 결과 만을 제시하기로 한다. 표 4.1은 국내 고속도로에서 운전자 반응도 $K_{p,d}$의 분포를 10가지 형태로 분류한 것이다.

표 4.1 국내 고속도로의 $K_{p,d}$ 값

운전자 유형	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$K_{p,d}$	0.218	0.456	0.620	0.741	0.863	0.992	1.124	1.339	1.610	2.039

본 연구에서 속도 구분을 위해 사용된 5 ft/sec와 30 ft/sec는 $K_{p,m}$ 결과치(자유속도 80 mph인 경우)를 이용한 것이며 세 가지의 속도에 따라 차량 추종 변수 K를 다음과 같이 설정하였다.

1. 차량 속도 > 30 ft/sec :

$K = K_{p,m} \times K_{p,d}$

2. 차량 속도 < 5 ft/sec :

$K = 2.0$

3. 5 ft/sec < 차량 속도 < 30 ft/sec :

$K = 2.0 + (K_{p,m} \times K_{p,d} - 2.0) \times (속도 - 5) / (30 - 속도)$

4.2 추종 유형의 분류

차량 추종 모형의 일반적인 개념은 '후행차는 선행차와 일정한 거리의 차두 간격을 유지하려는 성향을 가진다'는 것이다. 그러나 단지 추종 공식만을 사용할 경우, 선행차와 추종차가 충돌하는 경우가 발생하는데 이를 방지하기 위해서는 여러 가지 형태로 모형들을 분리하여 프로그램을 운영할 필요가 있다.

본 연구에서는 Pitt-KLD 모형의 YDO, YDZ, YC, YX 변수를 기초로 7가지 유형의 차량 추종을 이용하여 추종차의 가속도를 구하였다.

5. 차선 변경

차선 변경 모형(lane change model)은 미시적 교통류 모의실험에 있어서 중요한 요소이다. 차선 변경 모형을 구축하는 데에는 일반적으로 간격 수락 모형이 사용되며, 이 모형의 핵심적인 부분은 임계 간격(critical gap)을 결정하는 것이다. 또한, 임계 간격은 간격 수락 함수(gap acceptance function)나 임계 간격 분포에 의해 구할 수 있다. 여기서, 결정된 임계 간격과 같거나 그 이상의 간격이 확보되어야만 차선 변경을 수행할 수 있다. 고속국도 합류부에서 합류 과정도 차선 변경 과정(강제 차선 변경)으로 볼 수 있기 때문에 제대로 구축된 차선 변경 모형은 고속국도 기본 구간(basic segment)의 교통류 특성 분석뿐만 아니라 진입 연결로와 본선이 만나는 합류부의 교통류 특성 분석에도 매우 유용하다. 또, 차선 변경 모형은 표준 기하 구조의 개발이나 엇갈림 구간(weaving section)의 용량 분석 및 서비스 수준 평가, 교차로와 연결로의 지체와 용량을 평가하는 데도 중요하다.

5.1 차선 변경 로직

본 연구에서는 간격 수락 모형을 차선 변경 모형으로 채택하였으며, 운전자 유형에 따른 차선 변경 행태를 고려하였다. 차선 변경은 다음과 같은 3단계 과정으

로 이루어진다.

1. 차선을 변경할 것인지에 대한 의사 결정
2. 목적 차선(target lane)의 선택
3. 목적 차선에서 간격의 수락

따라서 본 모형에서의 차선 변경은 다음의 절차에 따라 수행된다.

▶ 1 단계 : 차량 x_{10}이 속도 V_{10}과 a_1 상태에서 거리 / 만큼 이동하는 데 소요되는 시간 t를 구한다.

$$S = x_{11} - x_{10} = V_0\ t + (at^2 / 2) \quad \cdots\cdots\cdots (5.1)$$

$$t = \{-V_{10} + [V_{10}^2 + (4a_1/2)]^{1/2}\} / a_1 \quad (\text{단, } a_1 \neq 0\text{인 경우}) \cdots\cdots\cdots (5.2)$$

$$t = S / V \quad (\text{단, } a_1 = 0\text{인 경우}) \quad \cdots\cdots\cdots (5.3)$$

▶ 2 단계 : t 초 후의 각 차량의 위치 d_i를 구한다.

$$d_i = (l^2 - b^2)^{1/2}$$

d_2, d_3는 식 5.1과 식 5.2에서 구한다.

▶ 3 단계 : IF d_2 - $LEAD^n$ > d_1 > d_3 + LAG^n THEN 차선 변경을 수행

ELSE IF d_1 > d_2 - $LEAD^n$

THEN a_1 을 '1 / Max.Acc.(최대 가속도)'씩 감소시켜 1 단계에서 3 단계를 반복한다.

ELSE a_1 을 '1 / Max.Acc.(최대 가속도)'씩 증가시켜 1 단계에서 3 단계를 반복한다.

여기서,

$LEAD^n$: 운전자 유형 n인 차량이 목적 차선의 선행 차량과 유지하고자 하는 최소 거리

LAG^n : 운전자 유형 n인 차량이 목적 차선의 후행 차량과 유지하고자 하는 최소 거리

이 과정에서 a_1이 Max.Acc.(최대 가속도)의 절대값 내에서 만족이 안되면 차선

변경은 이루어지지 않으며 현재의 차선으로 계속 주행하게 된다. 이때 이 차량은 현재 차선에서 차량 추종 규칙에 따르게 된다.

5.2 임계 간격

차선 변경 과정에서 목적 차선의 차량들이 만들어 내는 간격(차두 시간)을 t라 하고 차선 변경 차량이 목적 차선에 진입하기 위해 필요한 최소의 수락 간격을 T라 할 때 t > T인 경우는 목적 차선으로의 진입이 수락되고, t < T인 경우에는 진입이 거절된다. 임계 간격(critical gap)이란 t > T 인 경우에 진입하지 않은 차량수와 t < T 인 경우에 진입한 차량수가 같게 되는 임의의 수치를 의미한다. 따라서, 임계 간격보다 더 큰 간격이 발생했을 경우에 차선 변경을 고려하고 있는 차량들은 100% 그 간격을 수락한다고 가정하는 것이다. 그러나 임계 간격을 특정한 값으로 나타내는 것보다 확률 분포로 나타내는 것이 현실적이며, 계산상의 편리함 때문에 임계 간격의 평균값보다는 중앙값(median)을 더 많이 이용한다.

본 연구에서는 고속국도 기본 구간에서 선택적 차선 변경을 대상으로 임계 간격을 도출하였다. 현장에서 수집한 차두 시간 및 속도 자료들을 다음의 관계식을 이용하여 차두 간격으로 환산하였다.

$$h_j = (X_i - X_j) / V_j$$

즉, 임의의 차량 X_j가 앞차량 X_i와 이루고 있는 차두 간격은 X_j의 속도 V_j와 차두 시간 h_j를 곱해서 산출할 수 있다. 차두 시간이 6초(평균 속도를 약 110kph로 가정하면 차두 간격으로는 약 183m) 이내인 경우의 차두 간격을 누적시켜 누적 분포 함수(cumulative distribution function)를 그린 후 각 간격의 중간점(mid-point)과 만나는 차두 간격 값을 평균 차두 간격으로 나누어 구한다. 차선 변경시 간격 수락의 행태에 대해서도 K_{pd} factor와 마찬가지로 운전자를 10가지 유형으로 나누었다. 표 5.1은 운전자 유형별로 임계 간격을 10가지로 나타낸 것이다.

표 5.1 운전자 유형별 임계 간격

운전자 유형	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
임계간격(m)	9.10	27.26	35.55	41.44	47.33	53.22	59.11	70.83	87.08	117.82
운전자 성향	공격적(Aggressive)성향 ——————→ 소심한(Timid)성향									

각 운전자들은 표 5.1에 나타난 바와 같이 임계 간격 이상의 간격만 확보되면 100% 간격을 수락하게 된다. 즉, 목적 차선에 임계 간격 이상의 간격이 발생했을 경우 차선 변경 로직에 따라 차선을 변경한다.

5.3 차선 변경 확률

차선 변경 확률(Probabilities of Lane Change: PLC)은 임계 간격과 더불어 차선 변경 모형을 구축하는 데 중요한 요소로써, 단위 시간당 차선 변경 횟수를 편도 교통량으로 나눈 값으로 정의된다. PLC가 증가하면 상대적으로 도로 용량이 감소하며, 운동 방향의 전환으로 인해 어느 정도 교통 사고의 위험을 안게 된다. 일반적으로 교통량이 증가하면 PLC도 증가하는 경향이 있으나 어느 정도의 교통량에 다다르면 다시 감소하는 경향을 보인다. 이는 임계 교통량(PLC가 최대일 때의 교통량) 이상으로 차량이 증가하면 상대적으로 현재 주행 중인 차선의 효율성과 인접 차선들의 효율성(평균 속도, 중차량 유무)이 비슷해지는 경향이 있으며, 이로 인해 차선 변경의 필요성이 감소하기 때문이다. 다른 이유로는 교통량이 증가함에 따라 각 차선을 주행하는 차량들의 차두 시간이 감소하며 이로 인해 목적 차선에서 진입 가능 간격(acceptable gap)의 수가 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 고속도로 기본 구간에서 적절한 PLC 값으로 Northwestern 대학의 경험적 연구에 의하면 편도 2차선과 4차선인 경우에는 평균 0.05(5%)를, 편도 3차선인 경우는 평균 0.10(10%)을 각각 제시하고 있다. 현장 조사 결과를 보면 Northwestern 대학에서 제시한 PLC 값인 평균 5%와 대체로 일치하는 것으로 보인다. 교통량 수준별로 살펴보면 360대/5분인 때의 PLC가 5.587%로 가장 높게 나타났고 460대/5분인 때의 PLC는 3.247%로 오히려 가장 낮게 나타났다. 즉, 360대/5분/4차선을 기점으로 해서 교통량이 증가함에도 불구하고 대체적으로 PLC는 감소하는 양상을 띤다.

그러나 교통량 수준이 같은 경우라도 차량군의 평균 크기나 중차량 구성비에 따라 PLC가 달라질 수 있으며, 차선 이용의 규제 사항(버스 전용 차로제 등)에 의해서도 달라질 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 현장 조사 자료를 토대로 고속국도 기본 구간의 평균 PLC를 5%로 상정하였다.

6. 모의 평가

여기서는 여러 가지 교통 현상들이 복합적으로 나타나는 연결로 합류부를 선정

하여 개발된 모의실험 모형을 평가하였다. 평가의 기본틀은 개발된 모의실험 모형을 통해 산출된 효과 척도(Measure of Effectiveness)들이 현장에서 수집된 관측치와 어느 정도 유사한 경향을 나타내는지를 비교하는 것으로 하였다.

본 모의실험 모형의 평가에서 도입된 검사 방법(Inspection Approach)은 상기의 통계적 검정법을 사용하지 않고 실제 관측치에 대한 통계량(statistic)과 모의실험 모형의 통계량을 계산하여 두 통계량을 비교하는 방법이다. 주로 이러한 목적에 사용되는 통계량으로는 표본 평균(sample mean), 표본 분산(sample variance), 그래프 등이 있다.

본 연구에서는 현장의 실측치와 모의실험 모형에 대해 합류전(A지점)과 합류후(B지점)로 나누어 상기 제시한 3가지 효과 척도의 통계량(표본 평균, 표본 분산)을 비교·평가하였다. 표 6.1은 각 효과 척도에 대해 실측치와 모형의 표본 평균과 표본 분산을 비교한 것이며 효과 척도중 차선 변경 횟수는 A지점과 B지점 사이에서 15분 동안 발생한 차선 변경 횟수를 비교한 것이다.

먼저, 차두 시간을 보면 합류전(A지점)인 경우에는 실측치와 모형의 표본 평균과 표본 분산이 큰 차이가 없지만 합류후(B지점)인 경우에는 어느 정도 차이가 나타나고 있으며, 지점 속도에 있어서도 합류전보다 합류후에 어느 정도 차이가 나타나고 있다.

표 6.1 실측치와 모형의 통계량 비교

통계량		구분	효과 척도(Measure Of Effectiveness, MOE) 차두시간(초) 1차선	차두시간(초) 2차선	지점속도(kph) 1차선	지점속도(kph) 2차선	차선변경 횟수
A지점 (합류전)	표본 평균	모 형 ①	2.548	6.473	97.133	88.961	245
		실측치 ②	2.454	6.044	95.465	84.400	299
		비(①/②)	103.83%	107.10%	101.75%	105.40%	81.94%
	표본 분산	모 형	5.148	28.792	132.128	157.201	A지점과 B지점간 차선변경 횟수
		실측치	5.750	39.375	201.279	209.800	
		비 율	89.53%	73.12%	65.64%	74.93%	
B지점 (합류후)	표본 평균	모 형	2.231	3.374	92.644	79.218	
		실측치	2.023	2.997	85.265	72.255	
		비 율	110.28%	112.58%	108.65%	109.64%	
	표본 분산	모 형	3.674	5.453	87.422	130.826	
		실측치	1.305	5.127	133.745	222.320	
		비 율	281.53%	106.36%	65.36%	58.85%	

이는 A지점인 경우(합류전)에는 모형의 차량-추종 로직(car-following logic)이 어느 정도 실제의 차량-추종 현상을 유사하게 모사를 해주지만, B지점인 경우(합류후)에는 A지점과는 달리 빈번한 차선 변경 운동(lane change maneuver)이 발생한 이후의 지점이기 때문에 모형이 실제의 차선 변경 행태를 제대로 모사하지 못한 것으로 판단된다. 이것은 표 6.1에 나타난 바와 같이 모형에서 도출된 차선 변경 횟수가 실제의 차선 변경 횟수보다 적은 데서도 알 수 있다.

따라서 실제의 차선 변경 행태를 보다 정확히 모사할 수 있는 차선 변경 모형의 개발이 요구되며, 이를 위해서는 운전자 행태(driver's behavior)에 관한 심도 있는 연구가 선행되어야 할 것이다.

7. 결론

본 연구는 우리 나라 연속류 도로의 도로 및 교통 특성, 운전자 특성에 맞는 도로 교통류 모의실험 프로그램을 개발하는 연구로 수행되었다. 1994년 연구에서는 우리 나라 연속류 도로의 모의실험 프로그램 개발 계획과 방향을 제시하였고, 1995년 연구에서는 지방부 2차선 도로의 교통류 모의실험 프로그램을 개발한 바 있다. 본 연구에서는 고속국도 교통류를 모사하는 프로그램 개발에 연구의 초점을 두었다. 본 연구에서는 앞선 1994년의 연구와 1995년의 연구 결과를 바탕으로 연속류 도로의 대표 적인 고속국도의 교통 흐름, 차량 추종, 차선 변경 특성을 현장 조사와 분석을 통해 규명하고, 국내 고속국도의 특성을 반영할 수 있는 한국형 모의실험 모형을 개발하였다. 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

- 국내 고속국도 교통 흐름의 차두 시간, 속도, 차량군의 크기, 차선 변경, 중차량의 영향 등의 특성을 조사·분석하여 관련 매개 변수와 모형식을 도출하였다.
- 차량 생성 모형은 개별 차량의 차두 시간, 속도 분포를 이용하여 차량 분포 모형을 구축하고, 난수 발생 기법을 사용하여 진입 구간에서 모의 차량들을 발생시켰으며, 중차량 구성 비율에 따른 속도 변화를 연구하여 그 결과를 모형 구축에 응용하였다.
- 차량 추종 모형은 1995년 연구에서 검증된 PITT-KLD 모형에 기반을 두고 현장 실측 자료를 분석하여 차량 추종과 관련된 변수들을 설정하여 한국형 고속도로 모의실험 모형 구축에 적용하였다.

▸ 차선 변경 모형은 기본적으로 간격 수락 모형을 이용하고 차선 변경의 임계 간격을 국내 운전자들의 유형에 따라 10가지로 설정하였으며, 차선 변경 확률은 현장 조사 자료를 기초로 한 경험적 모형을 구축하여 산정하고 마코프 연쇄 기법과 비교·검토하였다.

▸ 개발된 모의실험 프로그램을 비교·평가하기 위해 합류부의 현장 조사 자료와 모의실험 결과를 비교·평가한 결과 합류 이전 단계에서는 실측치와 모형의 통계량이 어느 정도 유사한 양상을 보이지만 합류 이후 단계에서는 차이를 나타내고 있다. 따라서 모의실험 모형의 적정성이 부분적으로 입증되었으나, 모든 고속국도에 곧바로 적용하기에는 한계가 있을 것으로 보인다.

참 고 문 헌

1. 김상구, 수락간격모형을 이용한 연결로 용량산정모형에 관한 연구, 서울대학교 석사학위 논문, 1992.
2. 도철웅, 교통공학원론(상), 청문각, 1993.
3. 정준하, 도시 가로망 분석을 위한 미시적 모의실험 모형의 개발, 아주대학교 석사학위 논문, 1995.
4. 한국건설기술연구원, 연속류 도로의 한국형 모의실험 프로그램 개발(I), 1994.
5. 한국건설기술연구원, 연속류 도로의 한국형 모의실험 프로그램 개발(II), 1995.
6. 한국도로공사, 도로 설계 요령 제1권 도로 계획 및 기하 구조, 1992.
7. Athanasios Papoulis, "Probability, Random Variables, and Stochastic Processes", McGraw-Hill, Inc., 1991.
8. Carl W. Helstrom, "Probability and Stochastic Process for Engineers", Prentice-Hall Inc., 1991.
9. D. A. Wicks, E. B. Lieberman, "Development and Testing of INTRAS, A Microscopic Freeway Simulation Model Vol. 1, Program Design, Parameter Calibration and Freeway Dynamic Component Development", FHWA, 1977.

10. Daniel L. Gerlough, Matthew J. Huber, "Traffic Flow Theory, Special Report No. 165", TRB, 1975.
11. Drew, D. R., "Traffic Flow Theory and Control", McGraw-Hill, 1968.
12. FHWA Offices of Research & Development Traffic Systems Division Final Report Vol.1 Final Report, "Development and testing of INTRAS, a microscopic freeway simulation model", 1980.