

□ 論 文 □

URFSIM-1: 도시고속도로 교통류 시뮬레이션 모형 개발

(Development of Urban Freeway Traffic Simulation Model)

姜 貞 奎

(도로교통안전협회 교통과학연구원 수석연구원)

目 次

I. 서론	2. 2차원 교통량-밀도 관계식
1. 연구 배경 및 목적	3. URFSIM-1의 개발
2. 연구 내용 및 방법	IV. 모수추정 방법
II. 관련 문헌 연구 및 기본 개념	1. 접근방법
1. 시뮬레이션 모형 및 연속교통류 모형	2. 비실시간 NLS와 모수의 인지성
2. 거시적 연속교통류 모형	V. 시뮬레이션 모형의 평가
III. 연속교통류 시뮬레이션 모형의 개발	1. 가상자료를 이용한 모형 평가
1. 제안된 연속교통류 모형	2. 관측자료를 이용한 모형 평가
	VI. 결론 및 제언

요 약

국내 도시교통에서 도시고속도로가 차지하는 비중은 급증하고 있으나 이의 효율적인 운영은 아직 초보수준인 실정이다. 도시고속도로의 운영전략이나 기하구조 설계대안을 개발·분석·평가하는데 시뮬레이션 모형을 활용하는 것은 필수적이거나 외국에서 개발된 모형을 국내에 적용하는 데에는 많은 제약이 따르고 있다. 따라서 본 연구는 국내 현실에 적합한 도시고속도로 교통류 시뮬레이션 모형을 개발하려는 데 그 목적이 있으며 연속교통류 모형의 개발, 모수추정 방법의 제시, 컴퓨터 코딩, 모형평가의 세부작업이 수행되었다. URFSIM-1은 각 구간에서 통행목적지별 차량 수를 추적할 수 있는 통행수요모형 기능에 구간내 이동을 동적으로 기술할 수 있는 거시적 교통류모형을 결합한 것을 기본 교통류모형으로 채택하고 있다. 비선형 최소사승법에 의해 교통류모형 모수와 O-D 모수를 추정하는 방법이 제시되었다. 마지막으로 유고상황을 가정한 정성분석과 미국 도시고속도로에서 수집한 현장자료를 이용한 모형의 평가를 시행하였다.

I. 서론

1. 연구 배경 및 목적

도시고속도로란 도시부에 위치한 자동차전용도로로서 신호기나 표지의 통제를 받는 일반 시가지도로와 달리 진·출입이 제한되는 고속의 연속교통류 처리를 목적으로 하는 도로이다. 또한 도시고속도로는 그 기능상 도시부에 위치하므로 높은 통행수요, 빈번한 진·출입램프, 잦은 구간용량변화, 그리고 제약된 기하구조로 인하여 반복적 혼잡발생 비율이 높다는 점에서 지역간 고속도로와 구분된다.

국내의 경우 서울시에서 1998년까지 총 321km의 도시고속도로망을 구축할 예정이며, 부산, 대구, 광주 등의 대도시에서 각 100km내외의 도로망을 구상하고 있어서 가까운 장래에 도시 자동차교통량의 50% 이상이 도시고속도로에서 처리되는 시기가 도래할 전망이다. 그러나 이미 개통된 올림픽대로(42.5km)나 동부간선도로(30.3km)의 운영상황을 볼 때, 고속·고용량의 통행은 도시고속도로의 건설로만 보장되는 것이 아님을 알 수 있다. 국내 도시고속도로의 운영은 아직 초보적인 수준이며 특히 운영의 비효율은 정체를 일으킬 뿐 아니라 교통안전에 심각한 영향을 미치고 있다.

선진 외국의 대도시에서는 일반 간선도로와는 별도로 도시고속도로만을 관리하는 교통관제시스템과 안전관리대책을 도입·운영하고 있으며, 최근 지능형교통체계(ITS)의 전략 대상시설로서 그 중요도가 제고되고 있다. (컴퓨터)시뮬레이션 모형은 도로교통체계를 분석하거나 평가하는데 사용되어 왔다. 도시고속도로의 효율적 운영을 위한 시뮬레이션 모형의 필요성은 최근 들어 더욱 증대하고 있으며 구체적인 이유는 다음과 같다:

첫째, 시뮬레이션 모형의 전통적인 활용분야로서 도시고속도로의 운영전략이나 기하구조설계 대안을 분석하고 평가하기 위한 것이다.

둘째, 운영전략의 개발에 활용하기 위한 것으로 최근 들어 첨단교통운영체계(ATMS), 첨단운전자안내체계(ATIS) 전략구축에 대한 활용이 늘어나면서 연구가 급증하고 있다. 효율적인 운영전략을 구축하기 위해서는 시스템에 대한 최적화 기법이 요구되며 여기에는 실시간 교통상황 예측이 필수적이다. 따라서 진입램프 미터링이나 동적운전자 경로안내 같은 제어전략 구축시 링크의 혼잡도나 여행시간을 실시간으로 예측하는 부문에 대한 시뮬레이션 모형의 활용이 급증하고 있다.

시뮬레이션 모형에 채택되고 있는 모든 교통류 모형에는 미지의 모수들이 포함되어 있으며 이들의 추정결과는 시뮬레이션 모형 수행에 많은 영향을 미친다. 따라서 시뮬레이션 모형의 개발작업은 교통류 모형 및 모수추정 방법의 개발, 컴퓨터 코딩작업으로 분류될 수 있다. 그러므로 본 연구의 목적은 도로기하구조, 통행수요, 제어방식의 변화에 따라 도시고속도로 본선과 램프의 교통류 상황을 동적으로 예측할 수 있는 도시고속도로 교통류 시뮬레이션 모형을 개발하려는 것이다.

2. 연구 내용 및 방법

본 연구에서 제안될 도시고속도로 시뮬레이션 모형에서는 거시적 결정적 연속교통류 모형을 기본 교통류모형으로 채택하고 있다. 따라서 제2장에서는 기존 연속교통류 모형의 현황 및 문제점에 대한 분석이 제시되며, 제3장에서는 기존 모형들의 한계를 개선할 수 있는 거시적 연속교통류 모형이 제안된다. 제4장에서는 교통류모형에 필요한 모수를 추정하기 위한 비선형

최소자승법과 모수의 인지도에 대해서 논의한다. 제5장에서는 개발된 시물레이션 모형을 평가하기 위해서 유고상황을 가정한 정성분석과 미국 도시고속도로에서 수집한 현장자료를 이용한 정량분석이 실시된다. 마지막으로 제6장에서는 연구 결과를 요약하고 향후 과제에 대하여 논의한다.

II. 관련 문헌 연구 및 기본 개념

1. 시물레이션 모형 및 연속교통류 모형

(컴퓨터)시물레이션 모형에 대한 정의는 사용자에 따라서 다양하다. 본 연구에서는 "교통체계를 동적으로 나타내는 교통 모형 즉 수학적 모형을 디지털 컴퓨터에 의해서 수치해석 방법으로 푸는 컴퓨터 프로그램"이라 정의한다. 즉 시물레이션 모형은 교통 현상을 기술하는 모형을 채택하여 교통체계상의 시간적 변화를 추적하는 것이다. 시물레이션 모형을 구분하는 관점은 여러 가지가 있겠으나 채택된 교통 모형의 종류에 따라서 크게 공학용 모형과(engineering model) 계획용 모형(planning model)으로 대별될 수 있다. 계획용 모형은 어느 기점에서 어떤 목적지까지 어떤 경로로 갈 것인가 하는 O-D와 노선선정의 개념이 강화된 것이다. TRANPLAN, EMME-2, UTPS 계열이 널리 쓰여지고 있는 계획용 시물레이션 모형으로서 기점에서 종점까지 찾아가는 기능은 탁월하지만 인접 링크간 이동상황을 기술하는데에는 BPR(Bureau of Public Roads) 함수와 같은 간략한 식을 활용하는 이유로 정확도가 떨어진다. 반면에 공학용 모형은 목적지를 찾아가는 기능보다는 단순히 현 지점에서 인접한 지점으로 진행하려는 공간 이전행위의 효과적인 표현에

중점을 두고 개발된 것으로서 정교한 교통류모형(traffic flow model)을 채택하고 있는 것이 특징이다. FREFLO, FRESIM, KRONOS, FREQ 등이 알려진 공학용 모형이지만 운전자의 의사 결정과정이 제대로 고려되지 못하고 있어서 ITS 전략개발에 활용하는데 한계를 보이고 있다. 따라서 공학적 모형에 통행수요이론을 접목시킨 모형을 개발하여 ATMS 전략개발에 활용하는 것이 최근의 추세이다.

도시고속도로 시물레이션 모형에 채택되는 교통류모형은 교통류를 나타내는 수준에 따라 미시적(microscopic) 모형과 거시적(macroscopic) 모형으로 구분되며, 기술 유형에 따라 확률적(stochastic) 모형과 결정적(deterministic) 모형으로 구분된다. 따라서 교통류모형은 이 두 가지의 조합에 따라 미시·확률적 모형, 미시·결정적 모형, 거시·확률적 모형, 거시·결정적 모형의 4가지로 구분될 수 있다.

미시적 모형은 차량추종(car-following) 관계식(예: FRESIM)이나 여행시간 관계식(예: INTEGRATION)을 활용하여 개별차량의 이동을 추적하는 방식을 채택한다. 그러나 미시적 모형은 정산이 어렵고 컴퓨터 메모리가 과다하게 요구되는 등의 이유로 비교적 짧은 구간에 대한 기하구조 설계, 안전도 분석, 교통류제어전략 평가 등의 전통적인 시물레이션 모형의 목적구현에 활용되어 왔다. 반면에 거시적 교통류 모형은 유체보전의 법칙에 기반을 두고 교통류의 특성을 교통량, 속도, 밀도와 같은 거시적 변수로 표현한다. 미시적 교통류모형과 비교하여 적은 컴퓨터 메모리로 빠른 속도의 연산을 수행할 수 있으면서도 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있다. 또한 확률적 모형은 결정적 모형에 비해 확률현상으로 인한 체계수행의 변형을 고려할 수 있다는 장점이 있어서 모의시험자료를 발생시키는 등의 목적에 활용되거나 모형정산의

어려움과 최적화의 어려움 때문에 제어전략의 도출에 대한 활용이 극히 제한되는 것이다. 이와 같은 이유로 기존 도시고속도로 시뮬레이션 모형의 대부분이 거시·결정적 교통류모형을 채택하고 있는 것이다.

따라서 이후부터는 거시·결정적 모형으로 논의를 제한시켜 시뮬레이션 모형 개발에 필요한 기존 연속교통류 모형의 구조 및 문제점을 분석한다. 특별한 언급이 없으면 거시적 모형은 거시·결정적 모형을 의미하는 것으로 한다.

2. 거시적 연속교통류 모형 (Macroscopic continuum traffic flow models)

거시적 연속교통류 모형은 대상 고속도로를 수미터 내지 수백 미터 단위로 분할한 구간(Δx)을 대상으로 교통량, 밀도, 속도 등의 거시적 교통변수가 동적으로 변화하는 상황을 유체역학 원리를 응용하여 추적하는 것이다. 이를 위해서 몇 개의 식이 필요하게 되며 독립적인 속도방정식의 유무에 따라 simple continuum 모형(예: KRONOS)과 higher-order continuum 모형(예: FREFLO)으로 구분된다. 먼저 x = 공간(space), t = 시간(time)을 나타내는 매개변수라 하면 모형구성에 필요한 변수는 다음과 같이 정의된다:

$$\begin{aligned} q(x,t) &= \text{교통량(대/시)}, \\ k(x,t) &= \text{밀도(대/km)}, \\ u(x,t) &= \text{속도(km/시)}, \\ g(x,t) &= \text{유발요인(generation term)}, \\ u(k) &= \text{균형속도(equilibrium speed)}. \end{aligned}$$

첫 번째 관계식은 속도, 밀도, 교통량의 정의에서 비롯된 불변식이다.

$$q(x,t) = k(x,t) \cdot u(x,t) \quad (1)$$

둘째, 공간에 대한 교통량과 밀도의 시간적 변화관계를 나타내는 편미분방정식으로서 유체보존법칙(flow conservation)에서 유도된 것이다. 여기에서 $g(x,t)$ 는 진입램프나 진출램프에서 진입·출입하는 차량의 외생적 흐름을 나타내는 항이다.

$$\frac{\partial k(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x,t)}{\partial x} = g(x,t) \quad (2)$$

셋째, 속도는 밀도의 함수라는 가정에서, 현장 관측자료를 바탕으로 결정되는 균형 속도-밀도(equilibrium speed-density) 관계식이다.

$$u = u(k) \quad (3)$$

2.1 Simple continuum 모형

Simple continuum 모형은 식 (1), (2), (3)을 바탕으로 이루어진다. 이 모형은 간단한 상황에 대한 해석적 해(analytical solution)를 구할 수 있다는 장점이 있으나 현실적인 복잡한 상황에 대해서는 컴퓨터를 사용하여야 한다. 이 경우 편미분방정식 (2)를 수치해석 방법으로 풀어야 하며 일반적으로 유한차분법(finite difference method)이 이용된다. 여러가지 변형이 있으며 가장 간단한 것으로는 Euler 방법에 의한 1차 근사식으로 다음과 같이 유도된다.

$$k_j(t + \Delta t) = k_j(t) + \frac{\Delta t}{\Delta x} [q_{j-1}(t) - q_j(t) + g_j(t)] \quad (4)$$

여기에서 j 는 구간을 지칭하며, Δx 는 구간의 길이, Δt 는 시간 간격을 지칭한다. Simple continuum 모형의 해를 얻는 과정은 다음과 같다. 먼저 각 구간(Δx)별로 밀도에 대한 초기값 $k_j(t)$ 가 주어지면 식 (3)에 의해 각 구간별 속도 $u_j(t)$ 가 결정된다. 식 (1)에 의해서 교통량 $q_j(t)$

가 구해지면 식 (4)에 의해서 Δt 이후의 밀도 $k_j(t + \Delta t)$ 가 구해진다. 이상의 과정은 Δt 를 증가시키면서 시뮬레이션 시간이 완료될 때까지 반복된다.

Simple continuum 모형은 교통류에서 관측되는 충격파현상을 잘 구현해 주며, 모형구조가 간단하여 모형정산(calibration)이 용이하고 계산 시간이 짧다는 장점이 있다. 이 모형은 Lighthill and Whitham에(1955) 의해 제안된 이래 Castillo(1994), Ansoorge(1990), Michalopoulos(1984) 등에 의해 활발한 연구가 이루어지고 있다. Simple continuum 모형을 채택한 시뮬레이션 모형으로서는 Michalopoulos 등(1991)에 의해 개발된 KRONOS를 들 수 있다.

그러나 현실적으로 볼 때 차량군은 동적으로 가·감속하는 양상을 보이고 있어서 균형상태에 도달하는 경우는 관측하기 어렵다. 즉, 모형 수행 결과가 식 (3)에 의해 좌우되며 균형 속도-밀도 관계식만으로는 속도의 변화를 나타내기에 미흡하다는 것이다. 실제로 혼잡상황에서 식 (4)에서 계산된 구간밀도가 비현실적으로 높아져 가는 잠금(lockup)현상이 발생한다. 잠금현상은 식 (1), (2), (3)으로 구성되는 simple continuum 모형자체의 문제가 아니라 식 (2)를 수치해석적인 방법으로 푸는 과정에서 발생하는 것이다. 따라서 simple continuum 모형을 개선시키기 위하여 McCormack method, Upwind method, Lax method 등의 다양한 수치해석방법이 제안되어 왔다. 특히 Lax Method 는 KRONOS의 개발과정에 채택되었는데 식 (2)를 유한차분식으로 유도하는 과정에서 Numerical viscosity를 도입하여 잠금현상을 없애고 충격파현상의 구현도를 높인 것이며 다음과 같이 2차 근사식으로 유도된다.

$$k_j(t + \Delta t) = \frac{1}{2} [k_{j-1}(t) + k_{j+1}(t)] - \frac{\Delta t}{2\Delta x} [q_{j+1}(t) - q_{j-1}(t)] + \frac{1}{2} [g_{j-1}(t) + g_{j+1}(t)] \quad (5)$$

그러나 공간적인 간섭을 수치해석적인 방법으로 구현하기 때문에 각 지점에 특유한 교통 상황을 적절히 나타내는 데에는 한계가 있다. Lax method를 사용하여 충격파현상을 제대로 구현하기 위한 Δx 단위로써 연속교통류의 경우 30미터, 단속류의 경우 10미터 이하를 사용하여야 하기 때문에 계산량이 증대하는 단점이 있다. 또한 합류, 분류, 엇갈림, 차선이탈 등 side effect가 있는 경우나 기하구조가 변화하는 구간에서 복잡한 특수 모형을 사용하여야 하는 단점이 있다.

2.2 Higher-order continuum 모형

Higher-order continuum 모형은 simple continuum 모형의 한계를 개선하자는 의도에서 출발되었으며 시간과 공간에 대한 속도의 변화를 나타내는 독자적인 미분방정식을 추가시킨 것이 그 특징이다. 가장 널리 활용되는 것은 Payne이(1971) 개발하여 FREFLO에 채택한 식으로서 속도의 변화율은 convection, relaxation, anticipation의 3개항에 의해 영향을 받는 것이다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{T} [u_c(k) - u - \frac{\nu}{k} \frac{\partial k}{\partial x}] \quad (6)$$

따라서 Payne의 higher-order continuum 모형은 식 (1), (2), (3) 및 (6)에 의해 이루어지며 컴퓨터로 계산하기 위해서는 식 (4)와 유사하게 식 (6)에 대한 수치해석식이 개발되어야 한다. Payne의 경우 Euler 방법에 의거하여 유도된 수치해석식을 사용하였으며 식 (2)에 대한 수치해석식으로서 식 (4)가 이용되었다. Higher-order continuum 모형을 푸는 과정은 다음과 같다. 먼저 각 구간(Δx)별로 밀도에 대한 초기값 $k_j(t)$ 가 주어지면 식 (3)에 의해 각 구간별 균형속도

$u_e(t)$ 가 결정되고, 식 (6)에 대한 수치해석식에 의해 $u_j(t)$ 가 결정된다. 식 (1)에 의해서 교통량 $q_j(t)$ 가 구해지면 식 (4)에 의해서 Δt 이후의 밀도 $k_j(t+\Delta t)$ 가 구해진다. 이상의 과정은 Δt 를 증가시키면서 시뮬레이션 시간이 완료될 때까지 반복된다.

기대하였듯이 higher-order continuum 모형은 simple continuum 모형의 단점을 일부 개선한 것으로 평가된다. 즉 혼잡상황에 대한 속도의 변화가 특수한 수치해석식의 개발 없이도 비교적 잘 추적되었으며 Δx 의 길이에 대한 제약도 완화되었다. 그러나 차선이 줄어드는 애로구간에서 발생하는 잠금(lockup)현상문제는 해결되지 않았다. 잠금현상은 Δx 의 길이를 짧게 함으로써 해결이 가능하여 Babcock(1984)는 교통상황에 따라 Δx 를 신축적으로 조절하는 기법을 채택하였다. 이외에도 Papageorgiou(1989), Kuhne(1989)은 식 (6)을 일부 변형한 모형들을 각각 개발하여 프랑스와 독일 고속도로에 시험한 결과 개선된 결과를 얻은 것으로 보고하고 있다. 한편 Ross(1988)는 균형 속도-밀도 관계식의 존재를 부정하고 식 (3)과 식(6)을 다음과 같이 간략한 식으로 대체할 것을 주장하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{T}[F - v] \quad (7)$$

여기서 F 는 상수로서 자유주행속도이며 v 는 anticipation term이다. 이 접근방법은 일부 연구자의 동조를 얻기도 하였으나 충격파의 속도가 무한대로 나타나는 등 많은 문제가 제기되었다.

2.3 기존 시뮬레이션 모형의 한계

기존 시뮬레이션 모형은 링크간 교통류 이동 상황을 비교적 충실히 기술하고 있으나 ITS전략구축에 활용하기 위해서는 운전자 의사결정

과정이 보장되어야 한다. 대부분의 거시적 모의 실험모형은 운전자의 주행목적지에 대한 정보가 결여되어 있기 때문에 노선선정이 요구되는 진출램프 지점에서 본선교통량 중 정해진 비율(예: FREFLO, FREQ)이나 정해진 양의 교통량(예: KRONOS)을 진출시킨다. 따라서 램프 하류에서 발생하는 혼잡으로 인해 고속도로 본선으로의 역류(Spillback)현상을 기술하거나 운전자행태를 고려한 동적 노선배정 문제에 응용하는데는 한계가 따른다.

III. 연속교통류 시뮬레이션 모형의 개발

1. 제안된 연속교통류 모형

본 절에서는 기존 시뮬레이션 모형에 활용되는 연속교통류 모형의 한계를 개선시킬 수 있는 새로운 모형이 제안된다. 먼저 대상 고속도로시스템이 $i=1, \dots, m$ 까지 m 개의 지점, $j=1, \dots, s$ 까지 s 개의 종점, $k=1, \dots, n$ 까지 n 개의 링크로 구성되어 있다고 가정하자. 그리고 고속도로시스템의 상태를 나타내는 최소한의 상태변수를 다음과 같이 설정하자.

$x_{kj}(t)$ = 시간 t 현재 링크 k 에서 목적지 j 로
통행하려는 차량수,

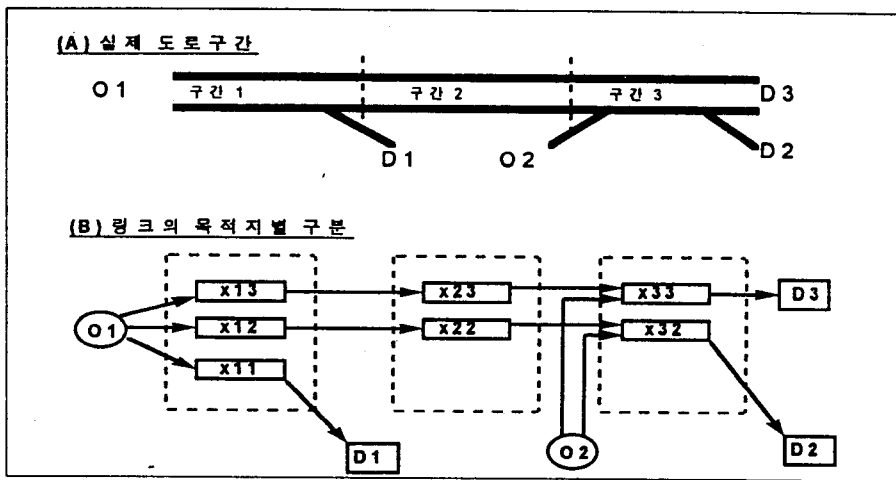
$y_d(t)$ = 시간 t 까지 검지기 d 를 통과한 차량수.

특정 링크에 있는 운전자가 예정 목적지에 도착하기 위한 노선결정은 지나온 경로에 관계 없이 현재 위치에서 목적지까지 노선대안에 따라 결정된다는 마코프(Markov) 노선선정 원칙을 따른다고 가정하자. 이 경우 시스템상태를 기술하는 최소한의 상태변수 단위는 각 링크의 목적지별 차량대수로서 총 $n \times s$ 개의 변수가 요

구 된다 (Davis, 1992; Papageorgiou and Messmer, 1991). 반면 기존 노선선정모형을 적용하기 위해서는 총 $m \times n \times s$ 개의 변수가 필요하므로 마코프 노선선정 원칙을 적용할 경우 필요변수의 수가 $1/m$ 로 줄어드는 것이다. 따라서 링크의 목적지별 차량대수 $x_{kj}(t)$ 를 교통류 모형 구성에 요구되는 최소한의 상태변수 벡터

로 설정한다. 한편 도로에 설치된 임의의 검지기 $y_d(t)$ 에서 시간에 따라 변화하는 차량대수나 점유율을 예측하여 실제 관측자료와 비교함으로써 모형 수행효과를 평가할 수 있다. 따라서 검지기 $y_d(t)$ 의 예측변수들을 상태변수 벡터에 추가시킬 수 있다.

제안된 연속교통류 모형의 수행개념을 설명



〈그림 1〉 제안된 연속교통류 모형의 구조

하기 위해서 〈그림 1〉에 2개의 기점과 3개의 종점 그리고 3개의 구간을 갖는 고속도로의 물리적 상태와 모형에 요구되는 상태변수 단위로 구분한 것을 예시하고 있다. 대상 고속도로의 본선구간은 그 구간에서 도착 가능한 목적지의 개수에 따라 가상의 구획(compartments)으로 세분된다. 따라서 동일 구획 내에 있는 차량들은 동일한 목적지를 향해 여행중인 차량들로만 구성된다. 먼저 유입램프(기점) i 에 도달한 교통량 $q_i(t)$ 는 O-D 비율 $b_{ij}(t)$ 에 의해 도달하는 목적지 j 가 부여되며 유입램프에 직접 연결된 본선구획에 배정된다. 각 구획에 있는 차량은 연결구조 및 속도에 따라 인접구획으로 이동한다. 본선구획에 있는 차량들은 진출램프(종점)

j 에 이르면 빠져나간다. 진입, 진출램프 뿐만이 아니라 본선구간에 설치된 가상의 검지기에서 구획간에 이동하는 교통류를 누적 계측하여 모형 수행결과를 요약한다.

이상에서 제시된 연속교통류 모형의 동적 수행과정은 다음과 같이 컴퓨터 알고리즘으로 요약될 수 있다.

[제0단계] O-D값 $b_{ij}(0)$ 와 각 구획의 초기 목적지별 차량대수 $x_{kj}(0)$ 가 주어진다. 시뮬레이션 개시 시각 $t=0$, 시뮬레이션 시간 증가 단위 $\Delta t=1초$.

[제1단계] 진입램프 상류에서 램프로 들어오는 목적지별 도착율 $g_{ij}(t) = q_i(t) \cdot b_{ij}(t)$.

Δt 계산. 여기서 $q_i(t)$ 는 진입램프상단에서의 도착교통류율(arrival rate)을 나타낸다. $t=t+\Delta t$ 로 시간 증가.

[제2단계] 본선 구획 j 에서의 이진율 $q_j(t)$ 를 계산. 여기에서 $q_j(t)$ 는 교통류율(flow rate)이며 뒷절에서 상세히 기술됨.

[제3단계] 각 구획별로 차량보전방정식을 Euler 방법에 의해 계산.

$$k_j(t+\Delta t) = k_j(t) + \frac{\Delta t}{\Delta x} [q_{j+1}(t) - q_{j-1}(t) + g_j(t)] \quad (8)$$

[제4단계] 시뮬레이션 시간 $t=t+\Delta t$ 로 증가.

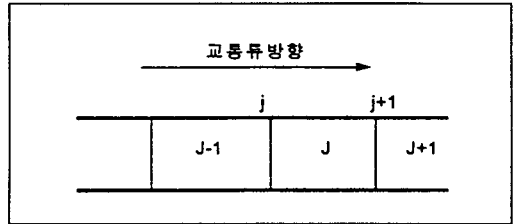
[제5단계] if $t < T$ [제1단계]로, else 시뮬레이션 종료.

2. 2차원 교통량-밀도 관계식

일반적으로 [제2단계]에서 요구되는 교통류율 $q_j(t)$ 를 계산하는데 교통량-밀도-속도 관계식이 활용된다. 특히 균형 밀도-속도 관계식에는 직선식, Bell식, 로그관계식, 다중(multiregime)관계식 등 많은 함수가 개발되어 왔으며 각 관계식은 나름대로의 장단점을 가지고 있다. 그러나 기본적으로 감·가속상태가 고려되지 않은 정적 모형이란 한계가 있다. 또한 차량보전관계식(2)를 수치해석 방법으로 푸는데 1차 근사적인 Euler식은 가장 효율적인 방법임에도 불구하고 잠금현상을 발생시킨다는 문제를 지적한 바 있다. 이를 개선하기 위해서 보다 고차의 수치해석식이나 독립된 속도방정식을 사용하는 것은 연산시간이 훨씬 복잡해지거나 모형정산이 어려운 한계가 있는 것이다.

이와 같은 문제점들을 개선하기 위하여 상·하류구간의 교통밀도 상황을 고려하여 감·가속상태 교통류를 동적으로 표현할 수 있는 2차원 교통량-밀도 관계식이 개발되었다. <그림 2>는 동

일 간격으로 구분된 고속도로 구간을 나타낸 것으로 대문자로 표시된 첨자 $J-1, J, J+1$ 은 구간(Δx)을 나타내고 소문자로 표시된 첨자 $j, j+1$ 은 두 구간의 경계지점을 나타낸다. 다음은 2차원 교통량-밀도 관계식의 유도과정을 나타낸 것이다.



<그림 2> 고속도로구간의 구획

(A) 시간 Δt 동안 구간 $J-1$ 에 있는 차량이 구간 J 로 이동할 확률, 즉 경계지점 j 를 통과할 확률:

$P_j(t) = [\text{구간 } J-1 \text{을 통과할 확률}] \cdot [\text{구간 } J \text{에 있는 차량에 의해 막히지 않을 확률}].$ 즉,

$$P_j(t) = \frac{u_{j-1}(k_{j-1}(t), k_j(t))}{L_{j-1}} \cdot \Delta t \quad (9)$$

여기서 $u_{j-1}(k_{j-1}(t), k_j(t))$ 는 구간 $J-1$ 의 평균속도
(B) 시간 Δt 동안 경계지점 j 에서의 교통류율:

$$q_j(t) = k_{j-1}(t) \cdot \frac{u_{j-1}(k_{j-1}(t), k_j(t))}{L_{j-1}} \cdot \Delta t \quad (10)$$

(C) 상·하류구간의 교통밀도를 동시에 고려하여 개발된 2차원 속도-밀도 관계식은 다음과 같다.

$$u_j(k_{j-1}, k_j) = u_{jc} e^{-\frac{1}{2}(\frac{k_{j-1}}{k_{jc}})^r} [1 - (\frac{k_j}{k_{jam}})^r] k_{j-1} \leq k_c$$

$$= \frac{q_{jc}}{k_{j-1}} [1 - (\frac{k_j}{k_{jam}})^r], k_{j-1} > k_c$$

여기서 $u_{jc} e^{-\frac{1}{2}(\frac{k_{j-1}}{k_{jc}})^r}$ 는 구간 $J-1$ 의 평균속도를 나타내는 함수로 Bell형 속도-밀도 관계식(May, 1990)을 채용한 것이며 $[1 - (\frac{k_j}{k_{jam}})^r]$ 은 하류의 교통상황이 상류에 영향을 미치는 anticipation항 역할을 하는 것으로서 상수 r 에 의해 모양이 결정된다.

(D) 따라서 경계지점 j 의 교통류율은 다음의 식으로 표현되며 <그림 3>은 경계지점 j 의 2차원 교통량-밀도 관계곡선을 나타낸 것이다.

$$q_j(k_{j-1}, k_j) = u_j e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{k_L}{k_c}\right)^r} \left[1 - \left(\frac{k_L}{k_{jam}}\right)^r\right], k_{j-1} \leq k_c \quad (12)$$

$$= q_c \left[1 - \left(\frac{k_L}{k_{jam}}\right)^r\right], k_{j-1} > k_c$$

여기에서,

k_{j-1}, k_j = 구간 J-1, J의 밀도,

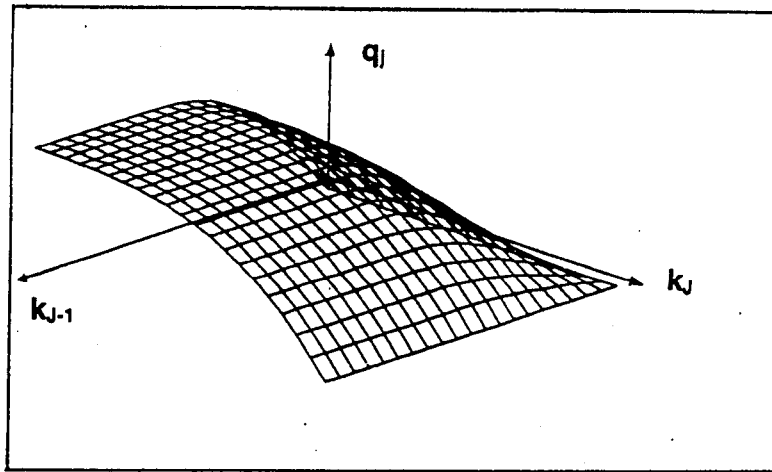
L_{j-1} = 구간 J-1의 길이,

$q_j(k_j, k_{j+1})$ = 구간 J와 J+1 경계부 j 의 교통류율,

q_c = 구간 J-1의 용량(capacity),

k_c = 구간 J-1의 임계밀도(critical density),

k_{jam} = 구간 J의 최대밀도(jam density).



<그림 3> 경계지점 j 의 2차원 교통량-밀도 관계곡선

3. URFSIM-1의 개발

이상에서 제시된 연속교통류 모형을 채택하여 시뮬레이션 모형을 개발하는데 있어서 다음과 같은 조건들을 충족시키도록 하였다.

- (1) 기본적으로 거시적, 결정적 모형의 구조를 갖는다. 이 모형구조는 모수추정 뿐 아니라 모형의 개발 및 응용 과정도 매우 단순화시키는 장점이 있다.
- (2) 상태변수의 단위를 각 구간의 목적지별 차량대수로 분화시켜 운전자의 의사결정과정을 포함시킬 수 있는 여지를 만들어 줌으로써 보다 분화된 거시적 모형구조를 갖는다.
- (3) Simple continuum 모형을 기본 교통류모

형으로 채택하되 2차원 교통량-밀도 관계식을 보완하여 기존 simple continuum 모형의 한계 (잠금 현상, 짧은 Δx)를 극복한다.

- (4) 수요초과, 기하구조, 공사나 유고 등에 의해 형성된 혼잡으로 인한 충격파 현상구현을 강화시키도록 하며 (3)에 의해 가능하다.
- (5) 진출램프 구간이나 엇갈림 구간에서의 역류현상을 분석할 수 있는 기능을 갖도록 한다. 이는 차량의 목적지를 모르고는 구현이 어려운 현상으로 (2)에 의해 가능하다.
- (6) 최적화전략에서 예측요소로 활용하기 위해 모형수행 시간이 짧아야 한다. 이는 (3)에 의해 비교적 긴 구간길이(Δx)를 이용할 수 있고 Euler 식을 사용함으로써 가능하다.

- (7) 향후 모형확장에 대비하여 개방형구조를 채택한다.

이상의 요건들을 만족시키도록 URFSIM-1(Urban Freeway SIMulation model version 1)이라고 명명된 도시고속도로 시뮬레이션 모형이 개발되었다. URFSIM-1은 FORTRAN으로 코딩되었으며 다음과 같은 부프로그램으로 구성된다.

- (1) READ_GEO: 대상도로 기하구조 및 교통류모형 모수 입력 모듈,
 - (2) READ_DEM: 각 진입램프에서의 시간대별(Time slice) 도착교통량 및 관측교통량 입력 모듈,
 - (3) OFF_PARA: 비실시간 최소자승법에 의한 교통류모형 모수 및 O-D 추정 모듈 (4장에 설명),
 - (4) TV_PARA: 칼만필터를 이용한 실시간 모수추정 모듈 (4장에 설명),
 - (5) CAL_SIM: 제3장 1절에 제시된 알고리즘을 수행하는 본 시뮬레이션 모듈,
 - (6) SUM_OUT: 시뮬레이션 결과 요약 모듈.
- URFSIM-1의 수행에 필요한 입력자료는 다음과 같다.

- (1) 시뮬레이션 모수 및 통행수요
 - 시뮬레이션 시간, 기·종점 수, Time slice 길이, 결과 요약 시간간격
- (2) 고속도로 구간(link)별 기하구조
 - 구간별 차선수, 길이, 자유주행 속도, 용량
- (3) 통행수요 자료
 - O-D자료, 각 기점 시간대별 통행수요
- (4) 교통류모형 모수 자료
 - 자유통행속도(u_f), 최적밀도(k_c), 최대밀도(k_{jam})

URFSIM-1의 수행이 완료되면 다음과 같은 출력자료가 제공된다.

- (1) 본선 검지기에서의 교통량, 점유율,

- (2) 구간별 평균속도, 평균밀도
- (3) 진입램프 도착교통량, 진출램프 통과교통량

IV. 모수추정 방법

1. 접근 방법

URFSIM-1을 수행하기 위해서는 다음 2종류의 모수군(parameters)이 관측자료에서 추정(estimation)되어야 한다.

- (1) 교통류모형 모수벡터 $w=(u_f, k_c, k_{jam}, r)^T$,
- (2) O-D 모수벡터 b .

먼저 도시고속도로의 O-D는 시간에 따라 변화하기 때문에 실시간으로 추정하는 것이 시뮬레이션 모형의 정확도를 높이는데 유용하다. 교통량 관측자료에서 O-D를 실시간으로 추정하는 분야에 관한 연구는 상당히 활발하다. URFSIM-1의 TV_PARA모듈은 칼만필터를 이용하여 실시간 O-D를 추정하는 알고리즘을 채택하고 있으며 이에 대한 세부내용은 최근의 연구에(강정규, 1996) 소개되어 있다. 따라서 본 논문에서는 교통류모형 모수추정으로 논의를 제한한다. 모수를 추정하는 방식에는 크게 비실시간(off-line)방식과 실시간(on-line)방식이 있다. 비실시간 모수추정방식은 계산시간이 길고 시간에 따른 모수 값의 변동을 추적하지 못한다는 단점이 있으나 다음과 같은 장점이 있다. 첫째, 실시간 모수추정방식의 초기 값을 제공하는데 활용되며, 둘째, 상당수의 실시간 추정방식이 비실시간 추정방식을 축차적으로 변환시킨 것이기 때문에 실시간 추정방법의 기초가 된다는 것이다. 본 절에서는 예측에러 최소화기법에 입각한 비실시간 비선형 최소자승법(Nonlinear least squares: NLS)을 제시한다. 알려졌듯이 최소화자승법은 최우추정법에 비하여 추정치의 효

율성(efficiency)이 낮은 반면에 추정과정이 단순한 장점이 있다. URFSIM-1에서는 NLS 방법이 비실시간 모수추정 모듈에 채택되었는데 그 이유는 추정자(estimator)의 선택에 따른 민감도분석 결과 NLS 방법이 최우추정법에 비해 현저하게 열등하지 않았기 때문이다.

2. 비실시간 NLS와 모수의 인지성 (Identifiability)

2.1 비실시간 비선형 최소자승법 (Offline Nonlinear Least Squares)

먼저 고속도로 체계 내에서 관측되는 교통자료는 입력자료와 인과관계를 갖는다고 설정한다. 고속도로 진입부의 교통량은 원인이 되고 체계 내에서 관측되는 속도, 밀도, 교통량 등은 원인에 대한 결과로 보는 것이다. 대상 고속도로가 m개의 기점, s개의 종점, n개의 링크, p개의 본선검지기들로 구성되어 있다고 가정하여 다음과 같이 변수를 설정한다:

상태변수 벡터: $\mathbf{x}(t) = (x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1s}, \dots, x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{ns})^T$;

진입램프 교통량 (입력자료): $\mathbf{q}(t) = (q_1, q_2, \dots, q_m)^T$;

진출램프 및 본선관측 교통량 (출력자료):

$$\mathbf{y}(t) = (y_1, y_2, \dots, y_s, y_{s+1}, \dots, y_{stp})^T;$$

미지의 모수벡터 = $[\mathbf{w}^T, \mathbf{b}^T]^T = [u_r, k_c, k_{jam}, b_{11}, \dots, b_{ms}]^T$.

여기에 입력자료 $\mathbf{q}(t)$ 와 출력자료 $\mathbf{y}(t)$ 는 N개의 ($t=1, \dots, N$) 일정시간 간격으로 관측된 시계열 자료로 이루어져 있다고 설정하자. 사전 정보 없이 모수를 추정하는데 일반적으로 최소자승 예측오차방법(minimum least squares prediction error method: MLSPEM)이 이용되는데 관측 벡터 $\mathbf{y}(t)$ 와 예측벡터 간의 $\hat{\mathbf{y}}(t, \boldsymbol{\beta})$ 차이의 자승을 최소화시키자는 것이다.

관측된 시계열 입력벡터 $\mathbf{q}(1), \mathbf{q}(2), \dots, \mathbf{q}(N)$ 과

시계열 출력벡터 $\mathbf{y}(1), \mathbf{y}(2), \dots, \mathbf{y}(N)$ 이 주어지고, 미지의 모수벡터 $\boldsymbol{\beta}$ 와 상태변수 \mathbf{x} 에 대한 초기 값들이 주어졌다고 가정하자. 주어진 문제는 다음의 최소자승기준을 만족시키는 미지의 모수 벡터 $\boldsymbol{\beta}$ 를 찾아내는 것이다.

$$\text{Min } S(\boldsymbol{\beta}) = \text{Min } \sum_{t=1}^N [\mathbf{y}(t) - \hat{\mathbf{y}}(t, \boldsymbol{\beta})]^T [\mathbf{y}(t) - \hat{\mathbf{y}}(t, \boldsymbol{\beta})] \quad (13)$$

여기에서,

$\mathbf{y}(t)$ = 검지기 관측값

$\hat{\mathbf{y}}(t, \boldsymbol{\beta})$ = 시뮬레이션 모형 예측값

N = 관측 시간단위 개수

시뮬레이션 모형 예측벡터 $\hat{\mathbf{y}}(t, \boldsymbol{\beta})$ 는 진입램프 입력벡터 $\mathbf{q}(t)$ 와 임의의 모수벡터 $\boldsymbol{\beta}$ 가 주어졌을 때 시뮬레이션 모형 URFSIM-1을 수행시켜 출력된 값이다. 즉 URFSIM-1이 입력 값이 주어졌을 경우 출력 값을 예측해내는 예측모형 기능을 수행하는 것이다. 참고로 $\hat{\mathbf{y}}(t, \boldsymbol{\beta})$ 는 모수 벡터 $\boldsymbol{\beta}$ 의 비선형함수이므로 \mathbf{S} 를 $\boldsymbol{\beta}$ 에 대해 최소화시키는 것은 비선형 최소자승문제가 성립되는 것이다. $\boldsymbol{\beta}$ 를 정산하기 위해서는 수치해석 방법이 필요하며 본 연구에서는 quasi-Newton 방법을 이용하였다.

2.2 모수의 인지성 (Parameter Identifiability)

모수의 인지성에 관한 문제는 유일해가 존재하는냐에 대한 이론적인 문제이며 모수추정을 시도하기 이전에 특정의 검지기 배열에서 관측한 자료를 이용하여 실제로 모수추정이 가능할 것인지의 여부를 판단하려는 것이다. 먼저 예측 벡터 $\hat{\mathbf{y}}(t, \boldsymbol{\beta})$ 를 모수벡터 $\boldsymbol{\beta}$ 에 대해 미분한 야코비안 행렬을 민감도계수(sensitivity coefficient) 행렬이라 정의하자

$$J(\beta) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \hat{y}(1, \beta)}{\partial \beta_1} & \dots & \frac{\partial \hat{y}(1, \beta)}{\partial \beta_p} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \hat{y}(N, \beta)}{\partial \beta_1} & \dots & \frac{\partial \hat{y}(N, \beta)}{\partial \beta_p} \end{bmatrix} \quad (14)$$

그러면 S 가 유일한 최소값(local minimum) β^* 를 가질 필요·충분조건은

$$(1) \frac{\partial \hat{y}(k, \beta^*)}{\partial \beta_i} = 0 \quad \text{for } i = 1, \dots, t$$

(2) 행렬 $J(\beta^*)^T J(\beta^*)$ 가 nonsingular 이어야 한다.

현실문제에 적용할 경우 주어진 검지기의 배열에서 원하는 모수추정이 가능할 것인지의 여부는 통상 관측되는 진입램프 교통량을 입력하여 임의의 값에서 행렬 $J(\beta^*)^T J(\beta^*)$ 의 결정인자(determinant)가 영(0)이 되는지의 여부를 점검하면 된다. 그러나 이와 같이 모수의 인지성이 이론적으로 존재하는 경우라도 수치해석 방법을 이용하여 모수를 추정할 경우 어려움을 겪는 경우가 종종 발생한다. 즉 모수들간에 상관관계가 존재하거나 자료의 관측범위가 특정 범위로 제한되어 있는 경우에 민감도계수들 간에 선형 종속성이 존재하게 되어 신뢰성 있는 모수추정이 어려워진다. 이 경우 추정하는 모수의 분산이 커지게 되어 정확도가 떨어지게 되는 것이다. 따라서 모수의 추정도(estimability), 또는 현실인지도(practical identifiability)는 관측 교통자료의 질과 양, 검지기의 배열, NLS나 최우추정법과 같은 추정자(estimators)의 선정, 수치해석 알고리즘 등에 의존하는 것이다. 특히 교통류모형 모수추정시 혼잡구간에 대한 관측자료가 결여될 경우에는 임계밀도 k_c 와 최대밀도 k_{jam} 의 추정치가 수렴되지 않고 분산이 계속 커지게 된다. 이 원리는 실시간 모수추정의 경우에도 적용이 된다. 따라서 URFSIM-1의 비실시간 모수추정 모듈 OFF_PARA에 모수의 인지성을 확인하는 기능을 삽입시켜 자료의 질이나 검지기

배열에 따른 모수추정의 문제점을 미리 점검하도록 하였다.

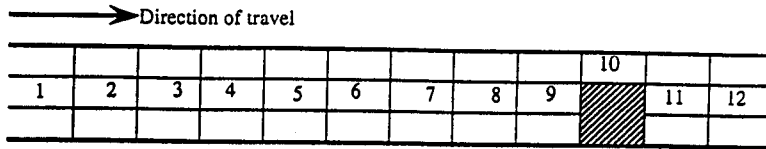
V. 시뮬레이션 모형의 평가

1. 가상자료를 이용한 모형평가

교통사고나 차량의 고장 등으로 발생한 유고는 통상 용량의 변화를 수반하며 시뮬레이션에서 재현하기가 상당히 까다로운 현상이다. 본 절에서는 가상의 기하구조와 통행패턴을 바탕으로 유고상황에 대한 정성분석을 시도하였다. <그림 4>는 진입·진출램프가 없는 7.24km의 직선구간으로서 12개의 소구간(Δx)으로 나뉘어져 있다. 각 소구간의 길이는 609.6m로 균일하게 구획되어 있으며 각 소구간의 차선 수는 3개이다. 1개 차선당 용량은 시간당 2,050대로서 구간당 용량은 6,150대/시이다. 총 시뮬레이션 시간은 150분이며 상류부에서 진입교통량은 4,200대/시로 설정하였다. 시뮬레이션 시간 30분에 소구간 10에서 유고가 발생하여 60분까지는 차선 두개가 폐쇄되어 소구간 용량이 2,150대/시이며, 60분부터 120분까지는 차선 한개가 폐쇄되어 소구간 용량이 4,300대/시가 되는 것으로 유고상황을 상정하였다 (<그림 4> 참조). 이와 같은 상황설정을 바탕으로 $u_i=104.6\text{kph}$, $k_c=37.8$ 대/km/차선, $k_{jam}=99.4\text{대/km/차선}$, $r=2.0$ 으로 모수를 설정하여 150분 동안 URFSIM-1을 수행하였다.

(1) 시뮬레이션 시간 30-60분 동안 소구간 10의 상류부에서 혼잡이 시작되어 상류방향(소구간 8과 소구간 4 밀도변화 참조)으로 혼잡이 전파되고 있다. 유고구간 상류부에서 밀도변화를 보면 교통량-밀도 곡선 우측의 혼잡영역에 급속히 도달한 이후 그 지점에 머무르고 있다. 동시간 동안 유고가 발생한 소구간 10에서의 밀도는

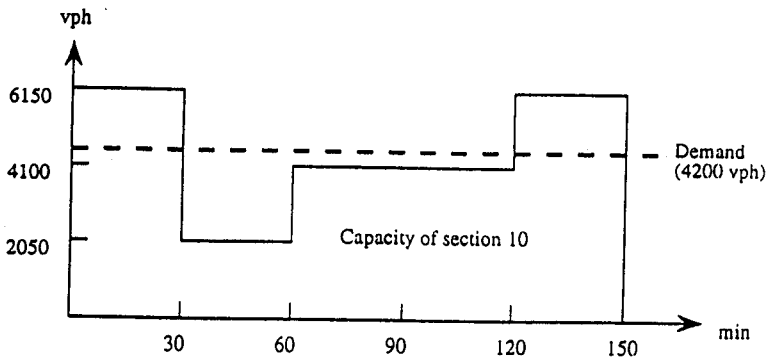
(A) 기하구조



Length = 12 * 606 meters = 7.27 km

Capacity = 6150 vph

(B) 통행수요 및 유고구간 용량변화



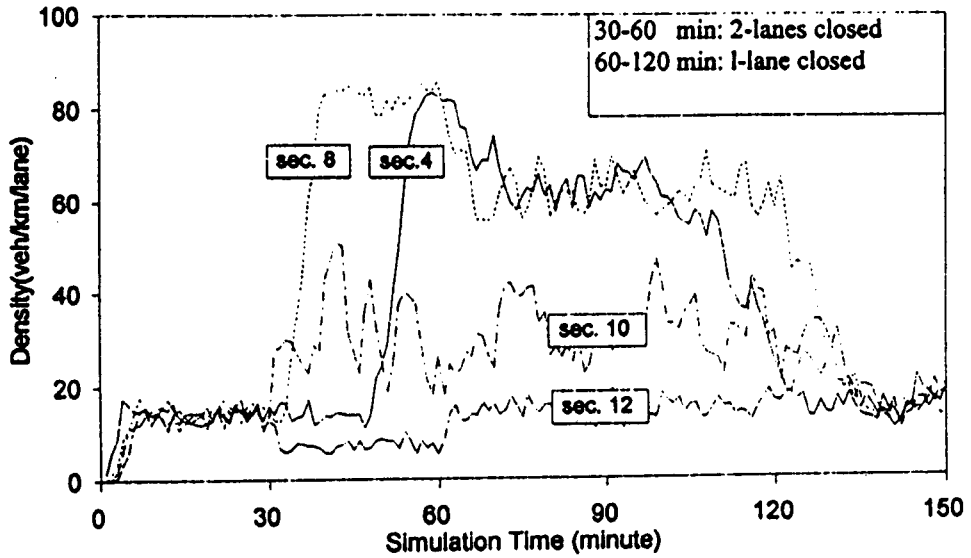
〈그림 4〉 유고상황 시뮬레이션 기하구조 및 통행수요

임계밀도인 $k_c=37.8$ 대/km/차선을 유지하고 있다. 한편 유고구간 하류부 (소구간 12)에서는 정체가 없는 상태를 유지하고 있다.

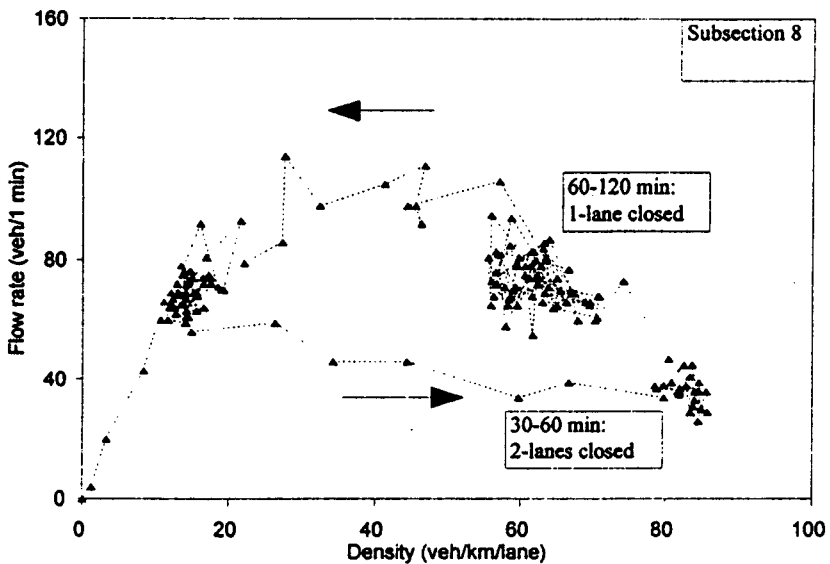
(2) 〈그림 5〉는 시뮬레이션 기간동안 유고발생지점의 상류부인 소구간 8에서의 교통량-밀도 변화를 1분 단위로 추적한 것이다. 유고발생 이전에는 낮은 밀도상태 (15대/km/차선)를 유지하면서 4,200대/시(70대/분) 수준의 교통량을 처리하고 있다. 그러나 시뮬레이션 시간 30분에 소구간 10에서 유고가 발생하자 급속히 밀도가 높아지면서 교통량이 낮아지고 있다. 소구간 10에서 2개 차선이 폐쇄되는 동안 높은 밀도상태 (85대/km/차선)를 유지하면서 2,150대/시(36대/분) 수준의 제한된 교통량을 처리하고 있다. 이후 유고상황이 완화됨에 따라 점차적으로 혼잡이 해소되며 용량이 회복되어 가고 있다.

(3) 이상에서 볼 때 URFSIM-1은 복잡한 유고상황의 진행과정을 합리적으로 구현해내고

있는 것으로 판단된다. 참고로 simple-continuum 모형을 채택하고 있는 시뮬레이션 모형에서는 유고 발생시 anticipation term의 부재로 인하여 급격한 잠금현상이 발생한다. 이를 방지하기 위하여 상류부에서의 도착교통량이 유고발생 지점의 용량보다 높을 경우에는 통과교통량을 유고 발생 지점 용량값으로 제약시키는 (Michalopoulos et. al, 1991 참조) 등의 특별 알고리즘을 채택하고 있다. 한편 higher-order 모형을 채택하고 있는 시뮬레이션 모형들에서는 잠금현상을 방지하기 위하여 유고상황시에만 매우 짧은 구간길이(Δx)를 이용하는 소위 adaptive 구조를 이용하는 (Babcock et. al, 1984 참조) 등의 노력을 기울이고 있다. 반면에 제시된 모의실험 결과는 유고상황에 대한 특별한 추가 모형작업 없이 구현된 것에 의의를 가질 수 있을 것이다. 다만 유고상황이 회복되는 경우에 정체 지속시간이 현실보다 짧게 나타나는 것에



<그림 5> 구간밀도의 시간대별 변화



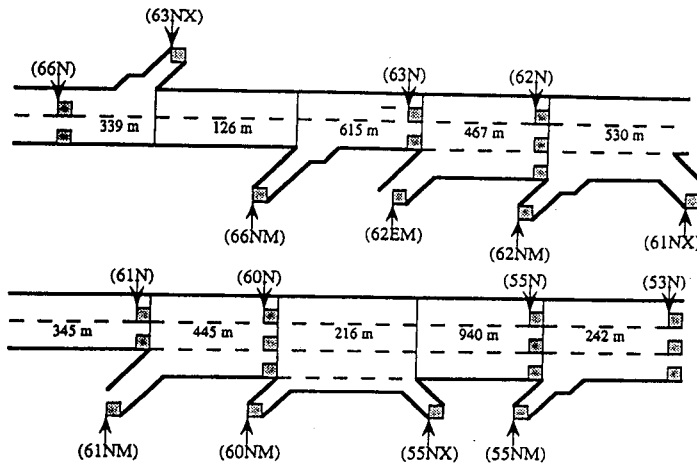
<그림 6> 구간밀도의 시간대별 변화

대한 언급이 필요할 것이다. 통상 정체가 풀리는 상황은 교통류가 가속상황에 있기 때문에 가속 또는 출발로 인한 손실이 발생한다. 이로 인해 감속상태나 균형상태에 있는 교통류보다 동일 밀도의 경우 교통량이 낮아지는 것이다. 이와 같은 현상을 모형에 반영시키기 위해서는 가속으로 인한 용량손실에 관해 현실 관측자료에 바탕을 둔 연구가 추가로 필요하다. 이에 대한 구체적인 연구는 추후로 미루며 다만 <그림 3>의 2차원 교통량-밀도 곡선에서 $q-k_{j,1}$ 평면의 모양을 조정하면 가속에 의한 용량저하 현상을 반영할 수 있다는 것만 언급한다.

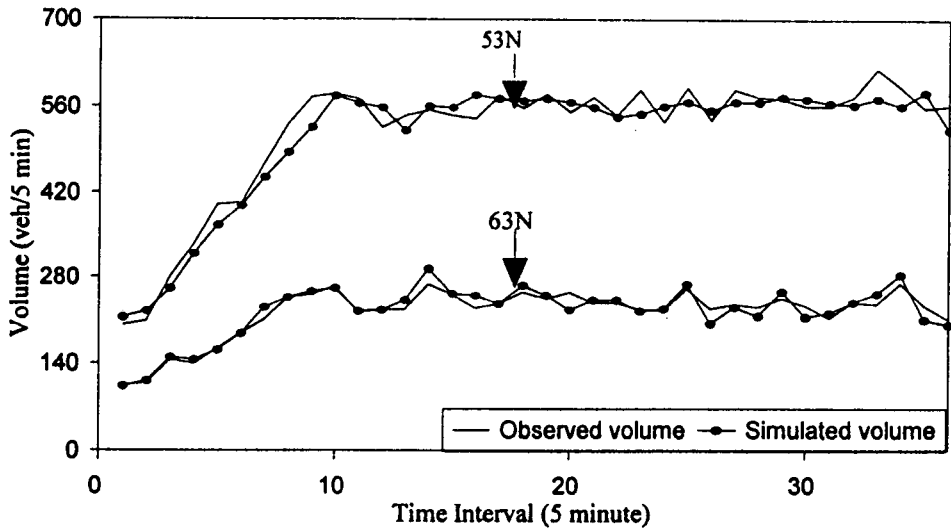
2. 관측자료를 이용한 모형평가

시뮬레이션 모형의 정확도를 평가하기 위하여 미국 미네소타주에 소재한 고속도로 I-35W 상의 4.0 km구간을 대상으로 하였다 (<그림 7> 참조). 대상구간은 7개의 기점과 4개의 종점으로 구성되어 있고 10개의 소구간으로 구분하였으며 진입·진출램프와 본선 7개 지점에 루프 검지기가 설치되어 있다. 미네소타주 교통관제 센터에서 1993년 3월 3일 오전 3시간(6:00-9:00

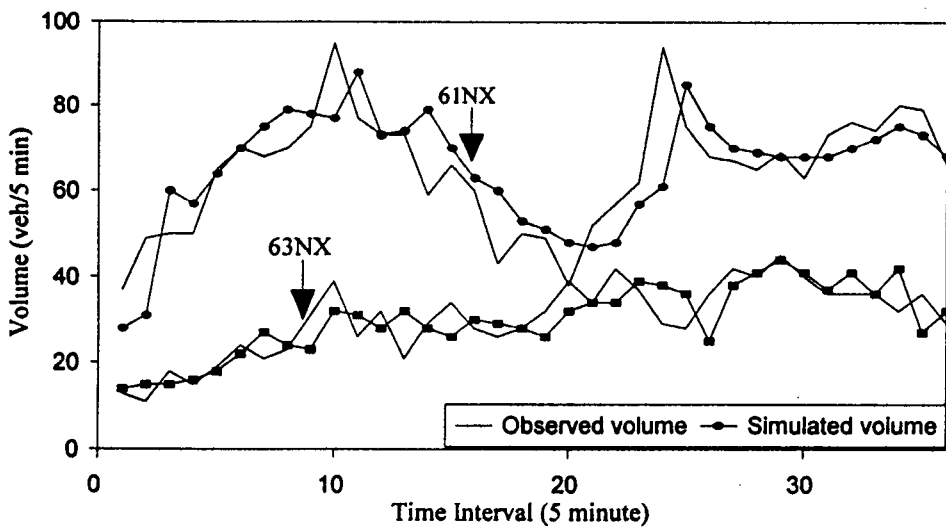
a.m.)동안 5분 단위의 교통량과 점유율 자료를 제공받았다. 이 구간은 높은 통행수요, 조밀한 진입·출입램프로 인한 잦은 차선변경 등 전형적인 도시고속도로의 특성을 나타내고 있다. 대상 시간대가 오전 첨두시간인 관계로 높은 통행수요가 있으나 집중적인 램프미터링을 통해 2,400 대/시에 육박할 정도로 높은 교통류율을 유지하면서도 극단적인 혼잡을 방지하고 있다(<그림 9, 11> 참조). 먼저 비선형 최소자승법에 의해서 $u=118.2$ km/시, $k_c=32.4$ 대/km/차선, $k_{jam}=99.4$ 대/km/차선, $r=2.0$ 의 교통류모형 모수 값과 O-D 벡터 b값이 구해졌다. 다음 진입램프에서 관측된 5분단위 교통량을 입력값으로 하여 URF-SIM-1을 수행하였으며 본선과 진입램프에 설치된 검지기 위치에서의 교통량과 점유율에 대한 시뮬레이션 결과를 5분 단위로 요약하였다. <그림 8>과 <그림 9>는 본선과 진출램프에 설치된 검지기에서 관측된 교통량과 시뮬레이션 모형 수행결과를 비교한 것이다. <그림 9>는 본선검지기 61N에서 관측된 차로별 평균점유율과 모형 수행결과를 비교한 것이다. 제한된 실험결과이나 교통량의 시간대별 변동을 비교적 충실히 구현해내는 것으로 판단된다.



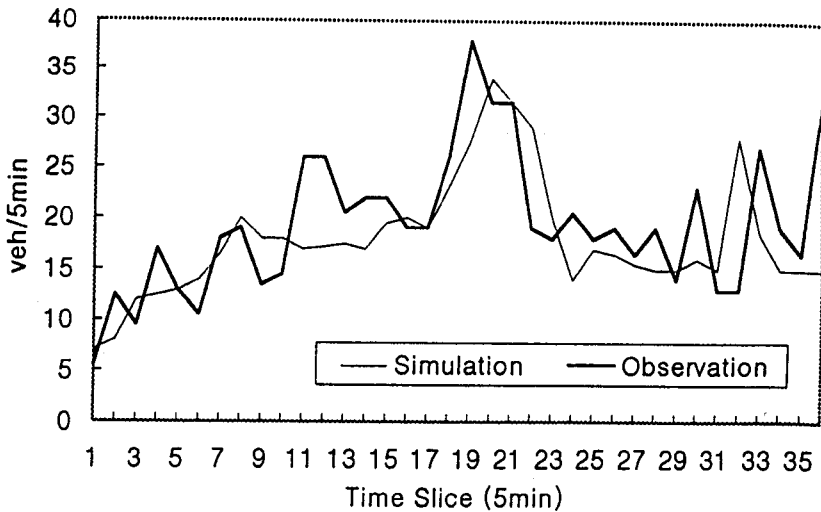
<그림 7> 모형평가 대상 도시고속도로(I-35W Minneapolis)



〈그림 8〉 시간대별 본선 관측교통량 및 시뮬레이션 결과 (53N, 63N)



〈그림 9〉 시간대별 진출램프 관측교통량 및 시뮬레이션 결과 (61NX, 63NX)



〈그림 10〉 시간대별 본선 관측점유율 및 시뮬레이션 결과 (53N, 63N)

〈표 1〉은 본선검지기에서 관측교통량과 시뮬레이션 결과를 비교하여 모형의 수행결과를 평가한 것으로서 모형수행결과는 다음의 지수에 의해 계산된 것이다. 참고로 절대평균오차가 상류부인 63N에서 13대/5분의 수준을 보이는 반면 하류부인 53N에서 28대/5분으로 높아져가는 경향을 보이고 있다. 그 원인으로 구간길이가 길어질수록 O-D 모수추정 에러 등의 누적에 따른 시뮬레이션 모형의 정확도가 떨어질 가능성을 들 수 있다. 그러나 보다 타당한 원인은 대상구간의 차로수와 교통량이 하류부로 갈수록 늘어나는 구간의 특성에서 찾아야 할 것이다.

즉 검지기 번호 53N에서의 관측교통량의 절대치가 63N보다 높기 때문에 절대평균오차가 높게 나타나는 것이다. 이는 절대평균 %차이가 63N부터 53N에 걸쳐 균일하게 2%내외를 보이고 있다는 점에서 뒷받침된다. 이상의 분석결과에서 볼 때 URFSIM-1은 도시고속도로 본선과 진출램프의 교통상황 변화를 비교적 효율적으로 기술 가능한 것으로 제한적인 평가를 내릴 수 있다.

$$\text{절대평균 \%차이} = \frac{1}{36} \sum_{t=1}^{36} 100 \cdot \frac{|y(t) - \hat{y}(t)|}{y(t)}$$

$$\text{절대평균오차} = \frac{1}{36} \sum_{t=1}^{36} |y(t) - \hat{y}(t)|$$

〈표 1〉 시뮬레이션 모형 수행결과 (5분 교통량)

검지기 번호	63N	62N	61N	55N	53N
절대평균% 차이	2.2	2.0	2.0	2.1	2.2
절대평균오차	13	21	18	27	28

VI. 결론 및 제언

1. 결론

이 논문의 목적은 그 비중이 제고되고 있는 도시고속도로의 효율적인 이용을 위해 도시고속도로 시뮬레이션 모형을 개발하는 것으로서 연속교통류 모형 개발, 모수추정방법 개발, 컴퓨터코딩, 모형평가의 세부과업이 수행되었다. 본 논문의 결과를 정리하면 다음과 같다.

첫째, 제안된 연속교통류 모형은 각 구간에서 통행목적지별 차량 수를 추적할 수 있는 통행수요모형 기능에 구간내 이동을 동적으로 기술할 수 있는 거시적 교통류모형을 결합한 것이다.

둘째, 관측교통자료를 이용해서 교통류모형에 필요한 모수추정 기법이 제안되었으며 현실적용시 모수의 추정여부를 판단할 수 있는 모수인식성에 관한 논의가 조건이 제시되었다.

셋째, 제안된 연속교통류모형을 바탕으로 시뮬레이션 모형 URFSIM-1이 개발되었다. 가상자료를 이용한 정성분석 결과 URFSIM-1은 비교적 간단한 모형구조에도 불구하고 복잡한 도시 교통상황을 합리적으로 기술하는 것으로 판단된다. 또한 현장자료를 이용한 평가 결과 URFSIM-1은 고속도로 본선과 진출램프의 교통상황 변화를 효율적으로 기술 가능한 것으로 평가된다. 따라서 제안된 모형은 도시고속도로의 교통체계 분석이나, ATMS 전략구축시 예측모형으로 활용이 가능할 것으로 보인다.

2. 제언

본격적인 도시고속도로 시대를 대비해서 이의 효율적인 운영방안에 대한 중점적인 연구가 요청된다. 외국에서 개발된 모형을 국내에 적용하는 것은 교통행태나 기하구조가 다르기 때문

에 한계가 있으며 국내현실에 적합한 교통류관리방식 등이 개발되어야 할 것이다. 특히 시뮬레이션 모형은 모든 연구의 기초가 되는 것으로 URFSIM-1의 개발은 본격적인 한국형 도시고속도로 시뮬레이션 모형 개발을 위한 초보단계로 판단된다. 향후 국내 도시고속도로에서 수집된 자료를 바탕으로 지속적인 모형평가와 기능 개선이 이루어져야 할 것이다. URFSIM-1의 국내 도시고속도로 상황에 대한 적용성을 높이기 위해서는 다음의 연구가 추가로 필요하다.

첫째, 차선변경, 진입, 진출, 엇갈림에 따른 간섭 등에 따른 용량저하 현상을 보다 잘 반영할 수 있도록 기능개선이 필요하다.

둘째, 진입램프제어, 다인승차량 전용차선 실시, 유고정책 평가 등 다양한 도시고속도로 교통류관리방안을 평가할 수 있는 기능의 추가가 필요하다.

셋째, 진출램프 하류부에 연결된 교량이나 신호등으로 인해 정체가 본선으로 역류(spillback)되어오는 현상을 보다 현실적으로 기술할 수 있는 기능의 추가가 필요하다. 선진국의 경우 역류현상 발생시 직접 연결된 차선만이 정체되는 경우가 정상이나, 국내의 경우 인접차선들까지 점유해 들어오는 운전자 행태 때문에 본선의 소통능력이 극히 떨어지고 있다. 이 경우 기존 외국모형의 적용성은 극히 제약되므로 한국적 현실을 바탕으로 한 모형 개발이 시급하다. 역류현상은 고속도로 구간내의 차선별로 구분하여 푸는 해법이 효율적이기 때문에 의무적 차선변경과 선택적 차선변경으로 구별된 차선변경모형의 개발이 필요하다.

넷째, 진입미터링 최적화방안을 마련하는 연구가 필요하다. 현재 세계적으로 통용되는 진입램프제어 방식은 고정식, 시간제변화식(TOD), 지역별 교통량감응식이 쓰이고 있다. 또한 LP를 활용한 시스템통합(System Integrated) 최적

화방법도 활용된다. 그러나 LP를 활용할 경우 예측모형의 비현실성으로 인해 최적화 해답의 신뢰도에 한계가 있다. 따라서 보다 현실적인 비선형모형을 예측모형으로 활용한 System Integrated Control 방식에 세계적으로 활발한 연구가 진행되고 있다. 따라서 제안된 시뮬레이션 모형을 예측모형으로 채택한 최적진입제어 방식을 개발하는 방안에 대한 검토가 필요할 것이다.

마지막으로, 도시고속도로와 인접 도로를 연계시켜 운영하는 방안을 고안하거나 평가할 수 있는 능력을 갖도록 모형을 확장시키는 분야에 대한 연구가 계획중이다.

참고문헌

- 강정규 (1996), "칼만필터를 이용한 도시고속도로 교통량예측 및 실시간 O-D 추정", 대한교통학회지 제14권 제3호, 대한교통학회, pp. 7-26.
- Ansonge, R. (1990), "What does the entropy condition mean in traffic flow theory?", Transpn. Res. Vol. 24B, No. 2, pp. 133-143
- Babcock, P., Auslander, D., Tomizuka, M. and May, A. (1984), "Role of Adaptive Discretization in a Freeway Simulation Model", Transpn. Res. Rec. 971, TRB, pp. 80-92
- Davis, G. and Kang, J. G. (1994), "Estimating destination-specific traffic densities on urban freeways for advanced traffic management", Transpn. Res. Rec., 1457, pp. 143-148.
- Gerlough, D. and Huber, M. (1975), Traffic Flow Theory: A Monograph, TRB, Special Report 165, Washington, D.C.
- Kang, J.-G. (1995), Estimation of destination-specific traffic densities and identification of parameters on urban freeways using Markov models of traffic flow, Ph.D. Thesis, University of Minnesota.
- Lax P. and Wendroff B. (1960), "Systems of conservation laws", Comm. Pure Appl. Math. 13, pp.217-237.
- Lighthill, M. and Whitham, G. (1955), "On kinematic waves: A theory of traffic flow on long crowded roads", Proceeding of the Royal Society, A229, No. 1178, pp. 317-345.
- May, A. (1990), Traffic Flow Fundamentals, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Michalopoulos, P. Eil K., and Kang J-G. (1991), "Enhancement and Field Testing of a Dynamic Freeway Simulation Program", Transpn. Res. Rec. 1320, TRB, pp. 203-215.
- Papageorgiou, M. and Messmer, A. (1991), "Dynamic network traffic assignment and route guidance via feedback regulation", Transpn. Res. Rec. 1306, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 49-58.
- Payne, H. (1979), "FREFLO: A macroscopic simulation model of freeway traffic", Transpn. Res. Rec., 722, TRB, pp. 68-77.
- Payne, H., Brown D. and Cohen, S. (1987), "Improved techniques for freeway surveillance", Transpn. Res. Rec. 1112, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 52-60.
- Ross, P. (1988), "Some properties of macroscopic traffic models", Transpn. Res. Rec. 1194, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 129-134.
- Stephanedes, Y. and Chang, K. (1993) Optimal control of freeway corridors, ASCE Journal of Transpn. Engineering. Vol. 119, No. 4, Jul./Aug., 504-514.