

都市高速道路 交通流 模擬實驗模型에
관한 研究

강정규 (도로교통안전협회 교통과학연구원)

도시고속도로 교통류 모의실험 모형에 관한 연구 (A Study on Freeway Traffic Simulation Model)

姜 貞 奎 (Jeong-Gyu Kang)
(도로교통안전협회 교통과학연구원 수석연구원)

목 차

- I. 서론
 - 1. 연구 배경 및 목적
 - 2. 연구 내용 및 방법
- II. 관련문헌 연구 및 기본개념
- III. 연속교통류 시뮬레이션 제안
 - 1. 제안된 연속교통류 모형
 - 2. 2차원 교통량-밀도-속도관계식
 - 3. 모형 정산
 - 4. 모형 평가
- IV. ATMS전략에 대한 시뮬레이션모형의 응용
 - 1. 개 요
 - 2. 목적지별 링크차량대수 및 O-D의 실시간 추정
 - 3. 동적 O-D추정방식 도입에 따른 예측모형의 효율성 평가
- V. 결론 및 제언

ABSTRACT

본 연구에서는 거시적 연속교통류 모형에 바탕을 둔 도시고속도로 시뮬레이션모형의 개발이 시도되었다. 이 모형은 simple continuum model에 통행수요모형 기능을 강화시킨 것으로서 기존 연속교통류 시뮬레이션모형의 단점을 개선하였다. 제안된 시뮬레이션모형은 정산과정을 거쳐 미국 도시고속도로에서 수집한 현장자료에 의해 평가되었다. 특히 링크의 목적지별 차량대수 추정, 실시간 O-D추정의 문제가 확장칼만필터의 형태로 접근되었으며, 개발된 시뮬레이션모형을 ATMS전략에 활용하는 방안이 개발·평가되었다. 이들 전 과정을 통합한 모수적응적 모형(Parameter Adaptive Model)에 의해 교통량을 실시간으로 예측(Real time traffic prediction)하는 방법을 제안하였으며 현장자료에 의해서 평가되었다.

I. 서론

1. 연구 배경 및 목적

■ 도시고속도로란 도시부에 위치한 자동차전용도로로서 진·출입이 제한되는 고속의 연속교통류 처리를 목적으로 하는 도로로서 신호 등의 통제를 받는 일반 시가지도로와 구분된다.

■ 또한 도시고속도로는 그 기능상 도시부에 위치하므로 높은 통행수요, 빈번한 진·출입램프, 잦은 구간용량변화, 그리고 제약된 기하구조로 인하여 반복적 혼잡 발생비율이 높다는 점에서 지역간 고속도로와 구분된다. 따라서 선진 외국의 대도시에서는 일반간선도로와는 별도로 도시고속도로만을 관리하는 교통관제시스템을 도입·운영하고 있으며, 최근 ATMS와 ATIS 전략 대상시설로서 그 중요도가 제고되고 있다.

■ 도시고속도로는 서울시에서 1998년까지 총 321km를 구축하는 것을 비롯하여, 부산, 대구, 광주 등의 대도시에서 각 100km내외의 도로망을 구상하고 있어서 가까운 장래에 전체 자동차교통량의 50%이상을 담당할 것으로 전망이다.

■ 그러나 이미 개통된 올림픽대로(42.5km), 서부간선도로(17.3km), 동부간선도로(30.3km)의 운영상황을 볼 때, 고속·고용량의 통행은 도시고속도로의 건설로만 보장되는 것은 아니다. 특히 운영의 비효율로 인한 문제는 정체에 그치지 않고 교통안전에 심각한 문제가 제시되고 있다.

■ 이렇게 대규모의 투자비를 들여 건설된 도시고속도로의 효율적인 운영을 위하여 신뢰성 있는 시뮬레이션모형 개발이 요구되며 다음과 같은 구체적인 이유를 들 수 있다. 첫째, 도시고속도로의 기하구조설계 대안이나 운영대안을 평가하기 위해서인데, 이것은 시뮬레이션모형의 전통적인 활용분야이기도 하다. 둘째, 보다 효율적인 운영전략의 개발에 활용하기 위함이며, 특히 첨단교통운영체계(ATMS), 첨단운전자안내체계(ATIS) 전략구축에 대한 활용은 대표적인 예이다. 효율적인 ATMS전략을 구축하기 위해서는 첫째, 실시간 교통상황 및 광역체계에 바탕을 두어야 하며 둘째, 혼잡대응방식보다는 혼잡을 예측하여 이를 방지하는 방식이 되어야 한다(Euler, 1992). 따라서 진입램프미터링과 같은 제어전략 구축시 필수요소인 실시간 교통상황 예측부문에 대한 시뮬레이션모형의 활용은 근래 활용도가 급증하고 있다.

■ 그러므로 본 연구의 목적은 첫째, 도시고속도로 본선과 램프의 교통류 상황을 동적으로 기술할 수 있는 연속교통류 시뮬레이션모형을 개발하고 둘째, 개발된 모형을 응용하여 ATMS전략구축에 대한 응용기법을 개발하는 것이다.

2. 연구 내용 및 방법

■ 여기에서 제시될 도시고속도로 시뮬레이션모형은 거시적 연속교통류 모형에 바탕을 둔 것이다. 따라서 제2장에서 연속교통류 모형에 기존 연구의 현황 및 문제점을 파악하며, 기존 문제점들을 개선할 수 있는 연속교통류 모형이 제3장에서 제안된다. 제안된 시뮬레이션모형은 정산과정을 거쳐 미국 도시고속도로에서 수집한 현장자료에 의해 평가된다. 제4장에서는 개발된 시뮬레이션모형을 ATMS전략구축에 활용하는 방안이 논의된다. 특히 링크의 목적지별 차량대수 추정, 실시간 O-D추정의 문제가 확장칼만필터의 형태로 해법이 모색된다. 이들 전 과정을 포함한 모수적응적 모형(Parameter Adaptive Model)에 의해 교통량을 실시간으로 예측(Real time traffic prediction)한다. 마지막으로 제5장에서는 연구결과를 요약하고 향후과제에 대하여 논의한다.

II. 관련문헌연구 및 기본개념

■ 연속교통류분석에 활용되는 시뮬레이션 모형은 미시적(microscopic) 모형과 거시적(macroscopic) 모형으로 대별된다. 미시적 시뮬레이션모형은 개별차량의 이동을 차량추종(car-following) 관계식(예: FRESIM)이나 여행시간 관계식(예: INTEGRATION)을 활용하여 추적하는 방식을 채택한다. 그러나 미시적 시뮬레이션 모형은 정산이 어렵고 컴퓨터 메모리가 과다하게 요구되는 등의 이유로 비교적 짧은 구간을 대상으로 기하구조설계, 안전도분석, 교통류제어전략 평가 등의 특수목적에 활용되어 왔다.

■ 반면에 교통류의 일반적인 분석이나 교통류제어전략 도출에 활용되는 거시적 시뮬레이션 모형은 유체보전의 법칙에 기반을 두고 교통류의 특성을 교통량, 속도, 밀도와 같은 거시적 변수로 표현한다. 거시적 시뮬레이션 모형은 속도를 기술하는 관성방정식의 유무에 따라 high-order continuum 모형과 (예: FREFLO) simple continuum 모형(예: KRONOS)으로 구분된다.

■ 거시적 연속교통류 모형

(A) 속도(u), 밀도(k), 교통량(q) 관계식:

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

(B) 차량보전(vehicle conservation) 방정식:

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

(C) 정적 속도-밀도(steady state speed-density) 관계식:

$$u = u_e(k)$$

(D) Simple continuum model: KRONOS

$$(A) + (B) + (C)$$

(E) High order continuum model: FREFLO

$$(A) + (B) + (C) + \text{동적연속방정식}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{T} \left[u_e(k) - u - \frac{\nu}{k} \frac{\partial k}{\partial x} \right]$$

■ 기존 거시적 시뮬레이션 모형은 링크간 교통류 이동상황을 비교적 충실히 기술하고 있으나 ATMS전략에 활용하기 위해서는 운전자 의사결정과정의 보강되어야 한다. 대부분의 거시적 모의실험모형은 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 램프하류에서 발생하는 혼잡으로 인한 고속도로 본선으로의 역류(Spillback)현상을 기술하거나 운전자행태를 고려한 동적 노선배정 문제에 응용하는데는 한계가 따른다.

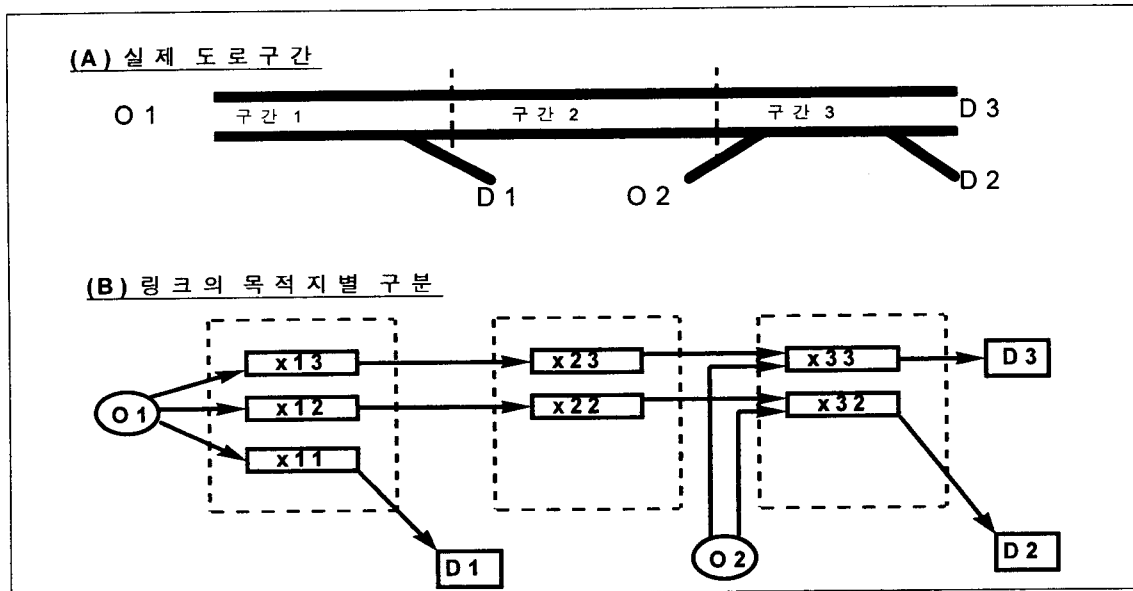
■ 이를 개선하기 위해서는 각 링크상의 주행목적지 분포를 추적할 수 있는 통행수요이론과 링크간 교통류 이동상황을 기술할 수 있는 교통류이론이 통합된 모형 개발이 필수적이다. 이러한 모형이야말로 관측교통량과 통행수요간의 인과관계를 보다 명확히 설정할 수 있으며, 수요변동이나 목적지변경에 따른 도착교통량의 변화를 예측할 수 있기 때문이다. 시뮬레이션모형 개발시 다음과 같은 요건들을 충족시키도록 하였다.

- (1) 유체식에 의한 연속교통류의 세밀한 표현이 가능해야 한다.
- (2) 기하구조, 공사나 유고 등에 의해 형성된 애로구간(bottlenecks)에 대한 분석 기능이 강화되어야 한다.
- (3) 램프 합·분류 구간, 엇갈림구간에 대한 교통상황 분석이 가능해야 한다.

(4) 진출램프 구간이나 엇갈림구간에서의 역류현상을 표현할 수 있어야 한다.

III. 연속교통류 시뮬레이션모형의 제안

1. 제안된 연속교통류 모형



■ 교통류모형을 설명하기 위하여 먼저 대상 고속도로시스템이 다음과 같이 m 개의 기점, s 개의 종점, n 개의 링크로 구성되어 있다고 가정하자.

$$i=1, \dots, m;$$

$$j=1, \dots, s;$$

$$k=1, \dots, n.$$

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

$y_d(t)$ = 시간 t 까지 검지기 d 를 통과한 차량수.

■ 특정 링크 상에 있는 운전자가 예정목적지에 도착하기 위한 노선결정은 지나온 경로에 관계없이 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 요구된다(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.

■ 링크의 목적지별 차량대수 $x_{kj}(t)$ 는 교통류모형 구성에 요구되는 최소한의 상태

변수 벡터로 간주될 수 있다. 대상 링크의 목적지별 차량대수 뿐만 아니라 도로에 설치된 검지기 $y_d(t)$ 에서 관측되는 차량대수까지 상태변수에 추가시켜 교통류의 변화가 추적 가능하다.

■ 시뮬레이션모형 개념으로서는 먼저 유입램프(기점) i 에 도달한 교통량 $q_i(t)$ 는 O-D 비율 $b_{ij}(t)$ 에 의해 도달하는 목적지 j 가 부여되어 유입램프에 연결된 본선링크의 구획에 배정된다. 각 구획에 있는 차량은 연결구조 및 속도에 따라 인접 구획으로 이동한다. 본선링크에 있는 차량들은 진출램프(종점) j 에 이르면 빠져나간다. 구획간에 차량이 이동하는 경로에 검지기가 설치되어 있는 경우 교통류의 상태를 누적 계측한다. 한편 고속도로시스템의 진입, 진출램프뿐만 아니라 본선에도 가상의 검지기를 설치하여 시뮬레이션 결과를 요약할 수 있다.

■ 이상의 과정은 다음과 같이 간단한 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 $t=0$, 시뮬레이션시간 증분 단위 $\Delta t=1$ 초.

[제1단계] 진입램프상류에서 진입램프로 들어오는 목적지별 도착율 $g_i(t) = q_i(t) \cdot b_{ij}(t) \cdot \Delta t$ 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 계산한다. 여기에서 $q_j(t)$ 는 교통류율(flow rate)이며 뒷절에서 상세히 기술됨.

[제3단계] 각 구획별로 차량보전방정식을 Euler방법에 의해 계산.

$$\frac{\partial k(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x, t)}{\partial x} = g(x, t) \quad (\text{식-1})$$

$$k_j(t + \Delta t) = k_j(t) + \frac{\Delta t}{\Delta x} [q_{j-1}(t) - q_j(t) + g_j(t)] \quad (\text{식-2})$$

[제4단계] 시뮬레이션 시간 $t=t+\Delta t$ 로 증가.

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

■ 입력자료

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

■ 출력자료

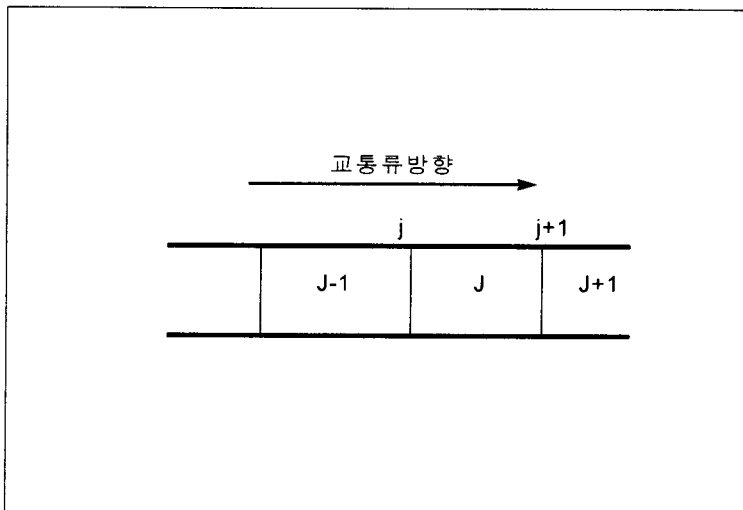
- (1) 본선 검지기에서의 교통량, 점유율,
- (2) 구간별 평균속도, 평균밀도
- (3) 진입램프 도착교통량, 진출램프 통과교통량

2. 2차원 교통량-밀도-속도 관계식

■ 일반적으로 [제2단계]에서 요구되는 교통류율 $q_i(t)$ 를 계산하는데 노선배정 모형에서는 BPR(Bureau of Public Road)함수 같은 간략한 식이 쓰이고 교통류 모형에서는 보다 정밀한 교통량-밀도-속도관계식이 활용된다. 특히 정적(steady state) 밀도-속도 관계식은 직선식, Bell식, 로그관계식, 다중(multiregime)관계식 등 많은 연구가 이루어져 왔으며 각 관계식은 나름대로의 장단점을 가지고 있다. 그러나 기본적으로 감·가속상태가 고려되지 않은 정적모형이란 한계가 있다.

■ 특히 차량보전관계식 (식-1)를 수치해석 방법으로 푸는 것과 관련하여 정적(steady state) 밀도-속도 관계식은 많은 문제를 야기하고 있다. 오일러방법 (식-2)는 (식-1)을 수치해석적으로 푸는데 있어서 가장 간편한 식으로 알려져 있으나 하류부에서 혼잡발생시 충격파를 상류부로 전달시키지 못하는 단점이 있다. 이것은 Lock-up 문제라 하며 High-order 관계식과 같은 교통류모형 자체의 개선이나, Lax 방법과 같이 수치해석적 방법을 이용한 개선에 관해 많은 연구가 이루어져왔다. 그러나 이들 방법은 연산이 훨씬 복잡해지거나 모형정산이 어려운 한계가 있어왔다.

■ 따라서 본 연구에서는 링크 상하류의 교통밀도상황을 고려하여 감·가속상태 교통류를 동적으로 표현할 수 있는 2차원 교통량-밀도 관계식이 개발되었다.



(A) 시간 Δt 동안 링크 J-1에 있는 차량이 링크 J로 이동할 확률, 즉 경계지점 j를 통과할 확률 = $p_j(t)$ = [링크 J-1을 통과할 확률] × [링크 J에 있는 차량에 의해 막히지 않을 확률]

$$= \frac{\bar{u}_{J-1}(k_{J-1}(t), k_J(t))}{L_{J-1}} \cdot \Delta t$$

(B) 시간 Δt 동안 경계지점 j의 교통류율 = $q_j(t)$ =

$$= k_{J-1}(t) \cdot \frac{\bar{u}_{J-1}(k_{J-1}(t), k_J(t))}{L_{J-1}} \cdot \Delta t$$

(C) 따라서 링크 상·하류의 교통밀도상황을 동시에 고려하여 평균속도 \bar{u}_{J-1} 을 정의하는 것이 필요하며, 다음과 같이 2차원 속도-밀도 관계식이 개발되었다

$$\begin{aligned} \bar{u}_j(k_{J-1}, k_J) &= u_f e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{k_{J-1}}{k_c}\right)^2} \left[1 - \left(\frac{k_J}{k_{jam}}\right)^\gamma\right], \quad k_{J-1} \leq k_c \\ &= \frac{q_c}{k_{J-1}} \left[1 - \left(\frac{k_J}{k_{jam}}\right)^\gamma\right], \quad k_{J-1} > k_c \end{aligned}$$

(D) 따라서 경계지점 j의 교통량:

$$\begin{aligned} q_j(k_{J-1}, k_J) &= k_{J-1} u_f e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{k_{J-1}}{k_c}\right)^2} \left[1 - \left(\frac{k_J}{k_{jam}}\right)^\gamma\right], \quad k_{J-1} \leq k_c \\ &= q_c \left[1 - \left(\frac{k_J}{k_{jam}}\right)^\gamma\right], \quad k_{J-1} > k_c \end{aligned}$$

여기에서

k_{J-1}, k_J = 링크 J-1, J의 밀도,

L_{J-1} = 링크 J-1의 길이,

$q_j(k_J, k_{J+1})$ = 링크 J와 J+1 경계부 j의 교통류율,

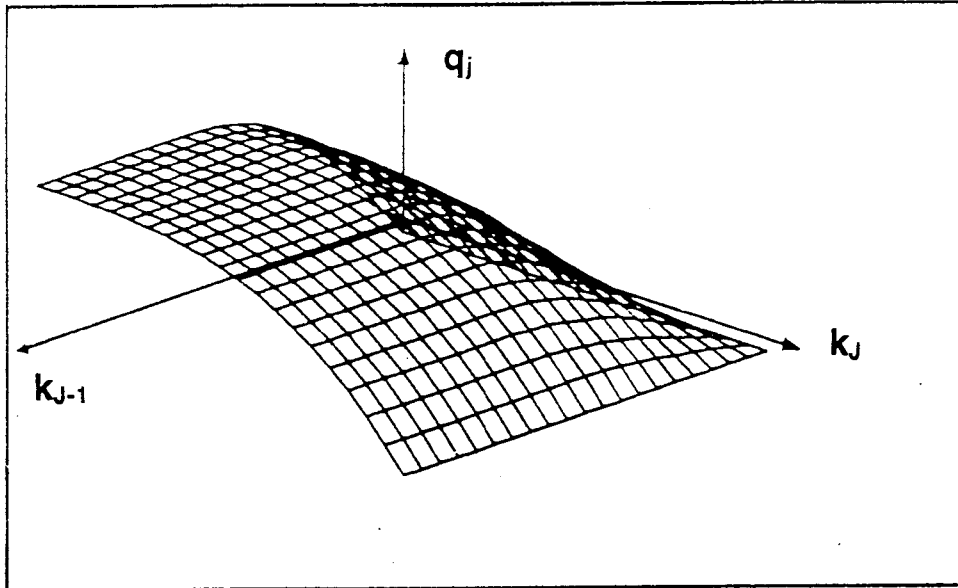
q_c = 링크 J-1의 용량(capacity),

k_c = 링크 J-1의 임계밀도(critical density),

k_{jam} = 링크 J의 최대밀도(jam density).

(E) 경계지점 j 의 2차원 교통량-밀도 관계식:

<그림> 2차원 교통량-밀도 관계도



3. 모형 정산

■ 제안된 시물레이션모형에는 2차원 교통량-밀도식 모수벡터 $w = (u_i, k_c, k_{jam}, r)^T$, O-D 벡터 b 가 필요하며 이들 모수들을 정산할 수 있는 기법이 필요하다.

3.1 Offline 비선형 최소자승법(Nonlinear Least Squares: NLS)

$$\text{Min } S(w, b) = \text{Min } \sum_{t=1}^N [y(t) - \hat{y}(t, w, b)]^T [y(t) - \hat{y}(t, w, b)]$$

여기에서,

$y(t)$ = 검지기 관측교통량, 점유율

$\hat{y}(t, w, b)$ = 시물레이션 모형 예측교통량, 점유율

N = 관측시간 개수

3.2 Offline 최우추정법(Maximum Likelihood Method)

$$\begin{aligned} \text{Min } LL(\mathbf{w}, \mathbf{b}) = & \text{Min} \sum_{t=1}^N [\log | S(t, \mathbf{w}, \mathbf{b}) | \\ & + (\mathbf{y}(t) - \hat{\mathbf{y}}(t, \mathbf{w}, \mathbf{b}))^T S(t, \mathbf{w}, \mathbf{b})^{-1} (\mathbf{y}(t) - \hat{\mathbf{y}}(t, \mathbf{w}, \mathbf{b}))] \end{aligned}$$

3.3 칼만필터를 이용한 축차적 모수추정법: 4장에 설명

4. 모형 평가

4.1 유고상황에 대한 정성분석

■ 교통사고나 차량의 고장 등으로 발생한 유고는 통상 용량의 변화를 수반하며 시뮬레이션에서 재현하기가 상당히 까다로운 현상이다. 여기서는 가상의 기하구조와 통행패턴을 바탕으로 정성분석을 시도하였다.

<그림 참조>

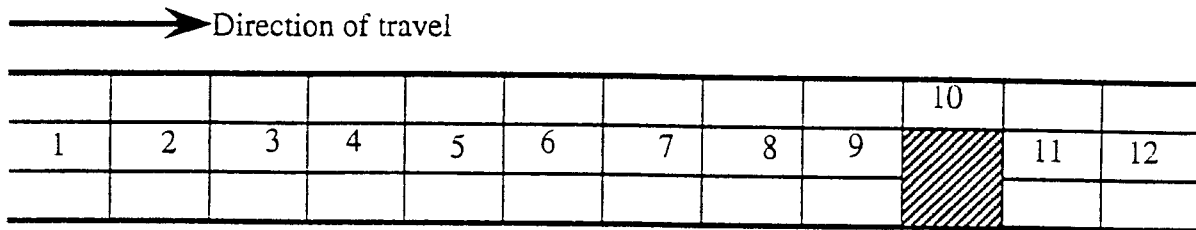
4.2 시뮬레이션 모형의 현장자료 평가

■ 모형의 정확도를 평가하기 위하여 미국 미네소타주에 소재한 고속도로 I-35W 상의 4.0 km구간을 대상으로 하였다. 대상구간은 7개의 기점과 4개의 종점으로 구성되었으며 10개의 소구간으로 구분하였다. 미네소타주 교통관제센터에서 1993년 3월 3일 오전 3시간(6:00-9:00 a.m.)의 교통량과 점유율자료를 제공받았다.

<그림 참조>

<그림> 유고상황 시뮬레이션 기하구조 및 통행수요

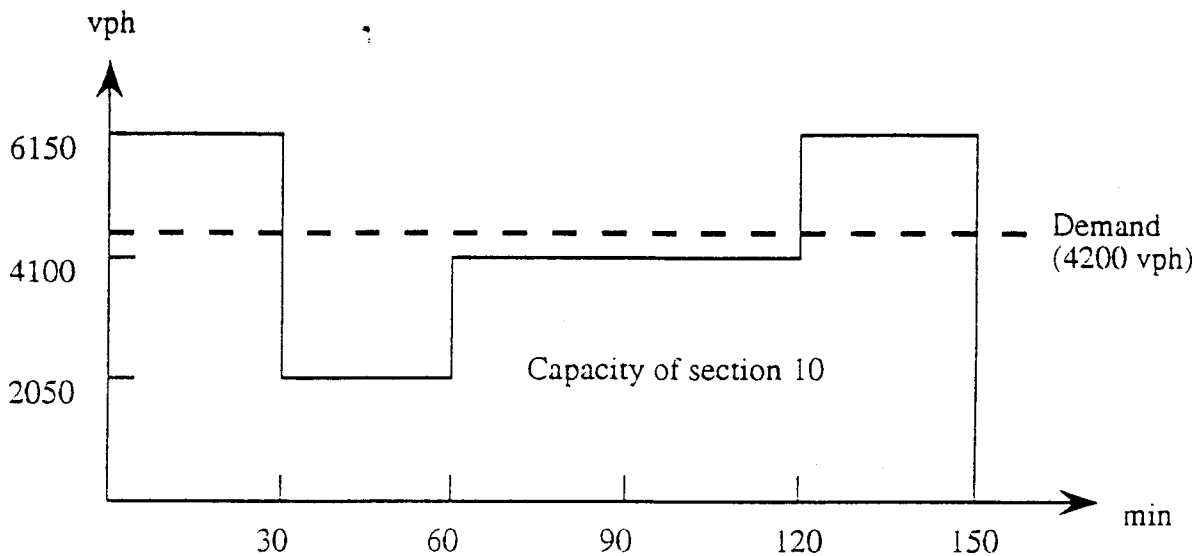
(A) 기하구조



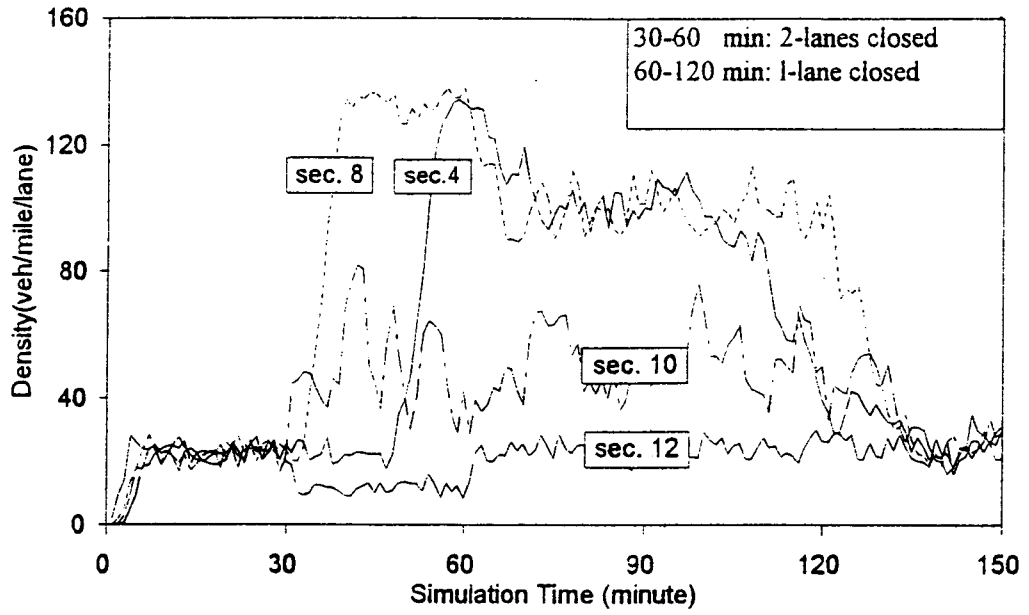
Length = 12 * 606 meters = 7.27 km (4.54 mile)

Capacity = 6150 vph

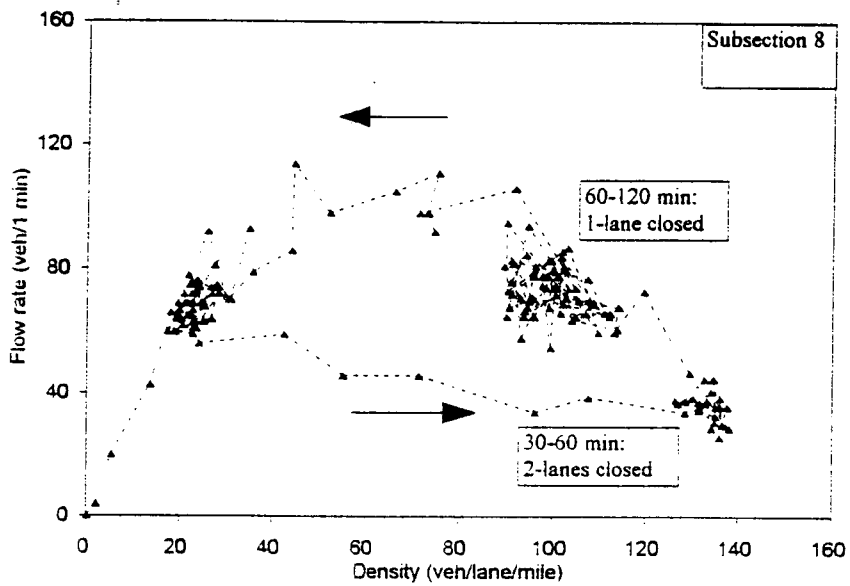
(B) 통행수요 및 유고구간 용량변화



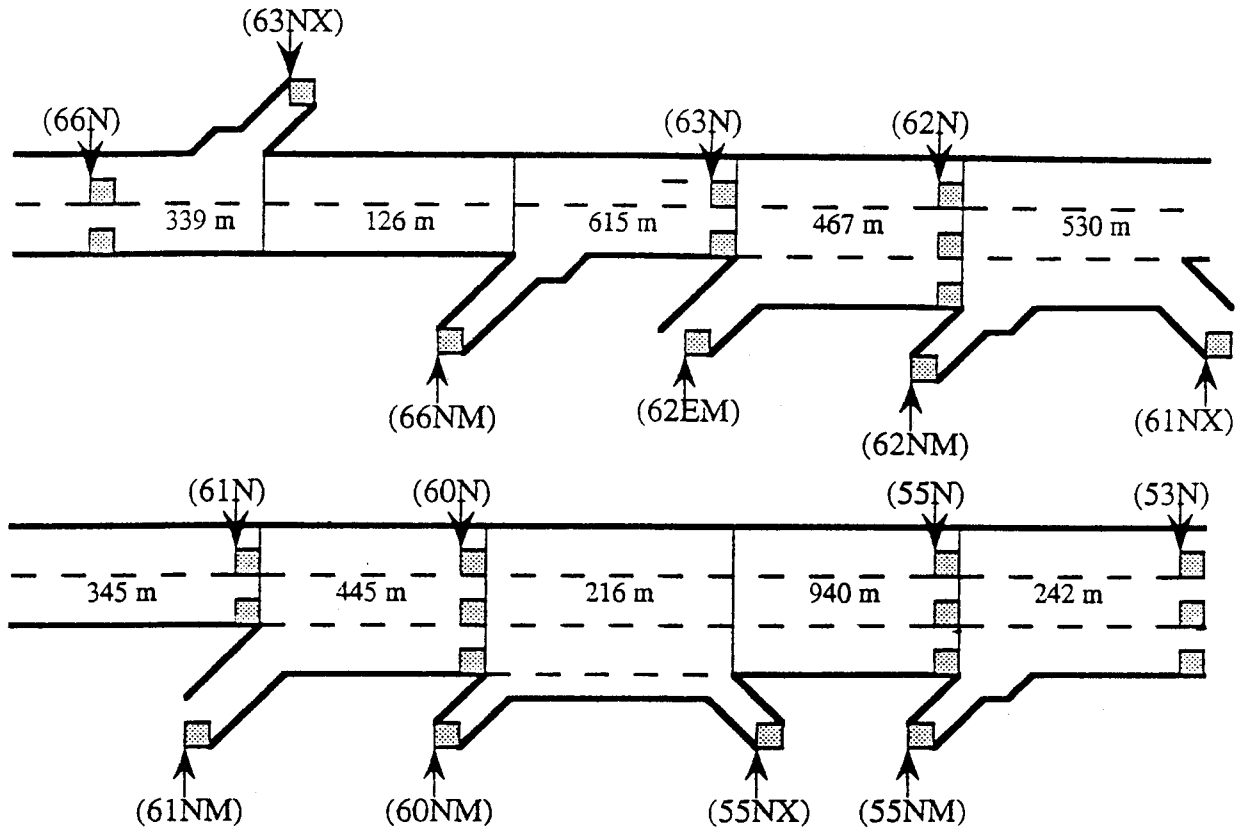
<그림> 구간밀도의 시간대별 변화



<그림> 구간 8에서 교통량-밀도의 시간대별 변화



<그림 > 7개의 기점과 4개의 종점을 가진 구간의 기하구조(I-35W)



<표 > 시뮬레이션 결과

검지기번호	63N	62N	61N	55N	53N
MAPD ⁽¹⁾	2.2	2.0	2.0	2.1	2.2
MAE ⁽²⁾	13	21	18	27	28

(1) 절대평균 % 오차 (%)

(2) 절대평균 오차 (대/5분)

IV. ATMS전략에 대한 시뮬레이션모형의 응용

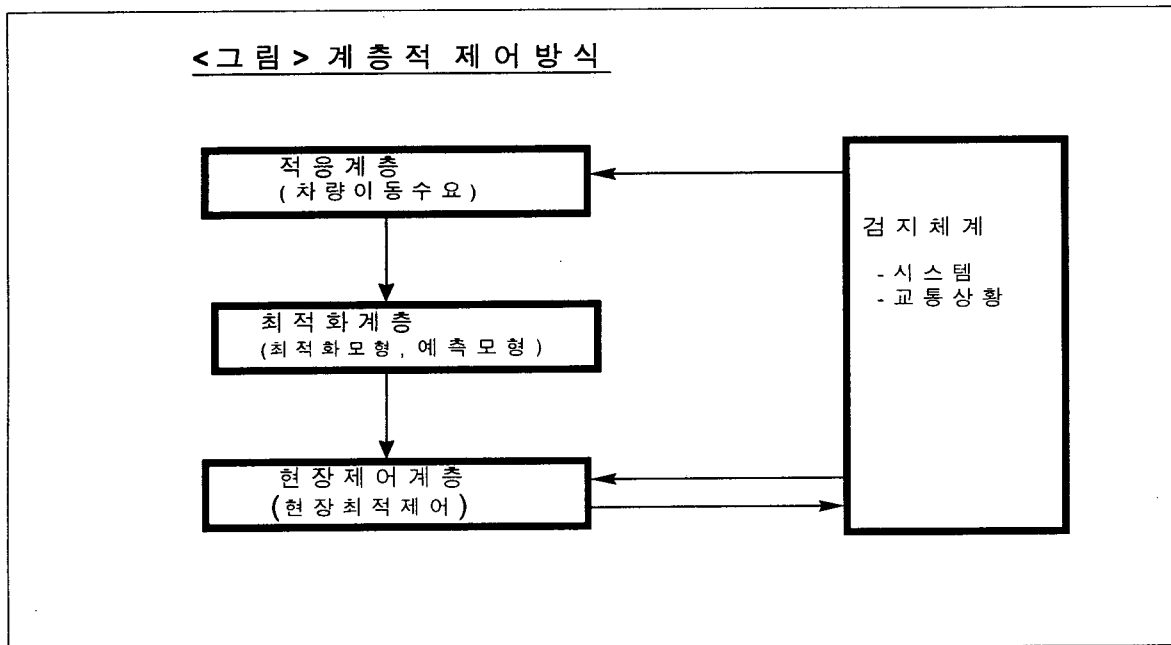
1. 개요

■ 성공적인 ATMS전략의 구축에는 실시간 교통상황에 바탕을 두고 혼잡을 예측하여 이를 방지하는 방식이 되어야 한다. 이러한 조건을 만족시키는 ATMS전략을 개발하기 위해서 최근 제안된 계층적 제어방식이 좋은 평가를 받고 있으며 각 계층은 다음과 같은 기능을 갖는다.

(1) 적응계층(adaptation layer)에서는 5분-30분 후의 차량이동수요(도착교통량, 기종점자료(O-D) 등)를 예측한다.

(2) 최적화계층(optimization layer)에서는 적응계층에서 주어진 수요와 대상시스템 전체를 고려한 최적제어안을 계산해내며 이를 위해서는 정교한 예측모형과 최적화모형이 필요하다.

(3) 현장제어계층(local control layer)에서는 최적화계층에서 도출된 결과를 목적함수나 제약조건으로 설정하여 현장상황에 적응된 최적제어를 실행한다.



■ 교통상황을 실시간으로 예측해낼 수 있는 모형을 확보하기 위해서는 다음과 같은 문제점들이 먼저 해결되어야 한다.

■ 첫째, ATMS전략에서는 매우 짧은 시간간격의 교통상황예측이 요구되기 때문에 여기에 필요한 예측모형은 정적인 교통계획모형이나 비실시간(off-line) 연속교통류 모의실험모형보다 추가적인 조건이 필요하다. 예를 들어 10분 후에 고속도

로의 본선이나 진출램프(종점)에 도착할 교통량은 향후 10분내에 진입램프(기점)에서 진입할 차량뿐 아니라 현재 본선에서 목적지로 운행하고 있는 차량도 고려되어야 하는 것이다. 즉 각 시간간격의 초기에 목적지별 링크차량대수가 실시간으로 주어져야 한다는 것이다.

■ 둘째, 실시간 기종점(O-D)자료의 추정문제이다. 차량의 이동수요는 O-D자료에 요약되는데 고속도로의 O-D비율은 시간에 따라 변화하기 때문에 실시간으로 추정되어야 하며 최근 실시간 교통정보를 기존 검지기자료에서 추출해내는 기법에 대한 활발한 노력이 이루어지고 있다. 그러나 링크교통량에서 신뢰성 있는 실시간 정보를 얻어내는 것은 상태변수와 관측교통량간의 동적 관계를 기술할 수 있는 모형의 미비 및 추정방법의 한계로 인하여 아직 실용적인 단계에 이르지 못하고 있다. 따라서 기점통행수요와 링크관측교통량간의 동적 인과관계를 명확히 기술할 수 있는 교통류모형을 예측방정식으로 채택하여 실시간 교통량자료로부터 O-D를 역으로 추출해낼 수 있는 필터모형의 개발이 필요하다.

■ 셋째, 이와 같은 기능이 포함되어 고속도로 본선과 진출램프에서의 교통량을 예측하는 모형이 개발되어야 한다.

2. 목적지별 링크차량대수 및 O-D의 실시간 추정에 응용

2.1 목적지별 링크차량대수 추정

(1) 각 링크내 목적지별 차량대수를 나타내는 열벡터 $x(t)$

$$x(t) = [x_{o1}(t), \dots, x_{om}(t), x_{11}(t), \dots, x_{ns}(t), x_{d1}(t), \dots, x_{ds}(t)]^T,$$

(2) 링크 끝에 설치된 검지기 통과차량대수를 나타내는 열벡터 $y(t)$ 를 다음과 같이 정의한다

$$y(t) = [y_1(t), \dots, y_p(t)]^T,$$

■ 수요추정목적에서 볼 때 목적지별 링크차량대수를 나타내는 벡터 $x(t)$ 는 교통체계구성의 기본이 되는 상태벡터로 간주될 수 있다. 그러나 기존 루프검지기에서 제공되는 자료는 시스템의 기점에서 종점으로 이동하는 차량이 특정 지점에서 시간간격별로 누적된 교통량이나 점유율정보이다. 따라서 상태벡터는 직접 관측되는 것이 아니라 관측자료에서 걸러내어야 하는 추정대상인 것이다. 이것은 필터문제이며 상태변수와 관측자료간의 관계를 명확히 기술하는 확률적모형이 있으면 체계분석이론을 적용하여 해결이 가능한 것이다.

2.2 실시간 O-D 추정

■ 고속도로망에서 기점은 진입램프를 지칭하며, 종점은 진출램프를 지칭하는데 기점 i 에서 차량이동수요는 도착교통량중 종점 j 로 향하는 O-D비율 b_{ij} 에 요약된다. 실시간O-D자료는 진입램프미터링, 최적노선유도, 유고관리, 동적통행배정 등과 같은 최적화기법에 필수적인 입력자료이다. 종래에는 이들 O-D 추정이 많은 시간과 비용을 요하는 수작업에 의해서 이루어졌지만 발달된 교통제어시스템, ATMS, ATIS에 필수적인 검지기 자료를 이용하여 추출해내는 방법에 대한 활발한 노력이 최근 이루어지고 있다. 이 방법의 기본원리는 직접관측이 불가능한 O-D자료와 링크관측교통량과 인과관계를 설정하여 링크교통량으로부터 O-D자료를 역으로 추정해내는 것이다.

■ 현존하는 대부분의 O-D 추정방법론은 예측에러최소화(Prediction Error Minimization: PEM) 기법을 채택하고 있다. 이 방법을 적용하기 위해서는 첫째, 유입램프에서 도착교통량과 O-D값이 주어졌을 경우에 본선과 유출램프에서의 링크교통량을 예측할 수 있는 모형이 필요하며, 둘째, 예측교통량과 관측교통량간의 차이를 최소화시키는 O-D값을 찾아내는 최적화방법이 필요하다.

■ 혼잡한 도시고속도로상의 동적 O-D를 추정하기 위해서는 기점에서 출발하는 차량이 종점까지 도착하는 경로를 연결하는 기능과 교통상황에 따른 링크지체시간을 산정할 수 있는 비선형 연속교통류모형을 체계방정식으로 채택하여 칼만필터 알고리즘을 적용하는 접근방법이 유용하다.

2.3 확장칼만필터(Extended Kalman filter) 모형을 이용한 추정

■ $b(t)$ 를 미지의 O-D 벡터로 정의하자. 기본적으로 逐次的 O-D추정방법은 1단계 먼저 추정된 O-D비율 $b(t_{k-1})$ 를 바탕으로 다음 시간간격동안 관측된 정보를 이용하여 $b(t_k)$ 를 추정하는 것이다. 여기에서 제안될 축차적 모수추정방식은 기존 상태변수벡터 $[x(t)^T, y(t)^T]^T$ 에 본질적으로 상수인 O-D벡터 $b(t)$ 가 보강된 복합상태변수를 추정해내는 상태추정방식이므로 확장칼만필터(Extended Kalman Filter: EKF)가 응용된다. EKF 방법을 적용하기 위해서는 대상시스템의 상태변화를 기술하는데 필수적인 체계방정식과 관측방정식이 정립되어야 한다.

■ 따라서 본 연구에서는 predictor-corrector형태의 확장된 칼만필터방식을 채용하였다. 먼저 prediction단계에서는 제안된 시뮬레이션 모형을 이용하여 5분 단위의 예측교통량이 얻어지게 되며, correction단계에서는 검지기 관측교통량을 바탕으로 목적지별 링크차량대수와 동적O-D가 추정되도록 설계되어 있다. 자세한 유도과정과 평가는 교통학회지 14권 제3호(1996) pp. 7-26을 참조하기 바람.

3. 동적 O-D추정방식 도입에 따른 예측모형의 효율성 평가

■ 평가에 필요한 자료를 수집하기 위하여 미국 미네소타주에 소재한 州間 고속도로(Interstate highway) I-35W의 1.3km 구간을 대상구간으로 선정하였다(이 구간은 2개의 진입램프와 1개의 진출램프가 배치되어 있고 램프뿐 아니라 본선 3개지점에 루프검지기가 설치되어 있다.

■ 본 절의 평가에서는 교통류모형 관련변수는 고정 값으로 설정하여 다음과 같이 2가지 경우를 비교하여 동적 O-D비율을 추정방법을 도입하는데 따른 효율평가가 가능하다.

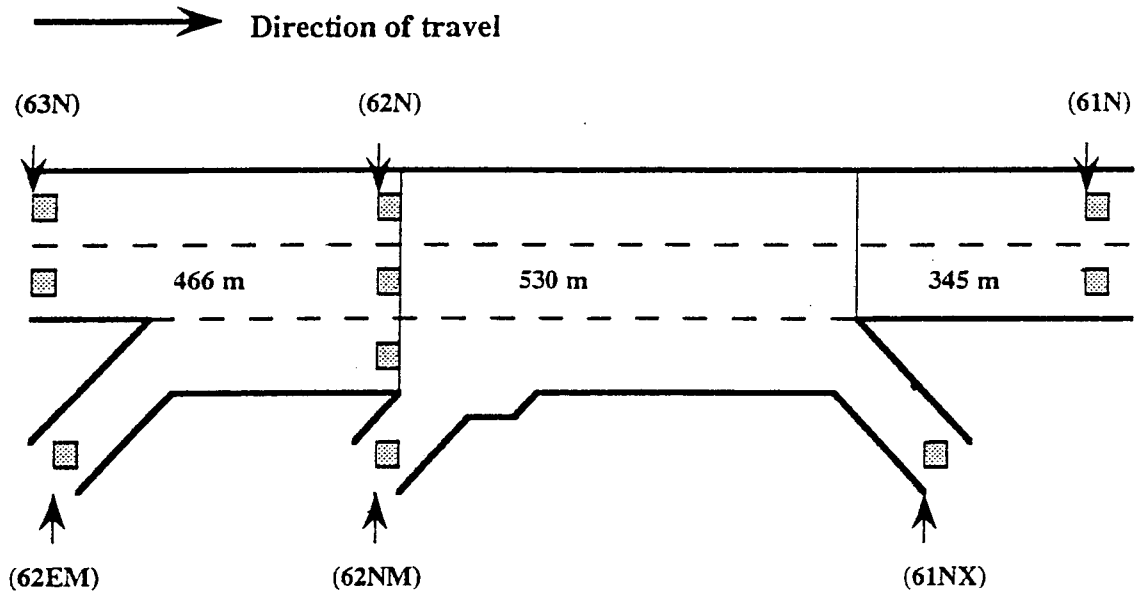
▶ 모형A: Offline NLS에 의해 추정된 O-D비율 $b_{11}=0.16$, $b_{21}=0.19$, $b_{31}=0.1$ 을 3시간동안 고정시키고 필터모형에 의해 교통량예측

▶ 모형B: 동적O-D비율을 매 5분마다 실시간으로 추정하면서 필터모형에 의해 교통량예측

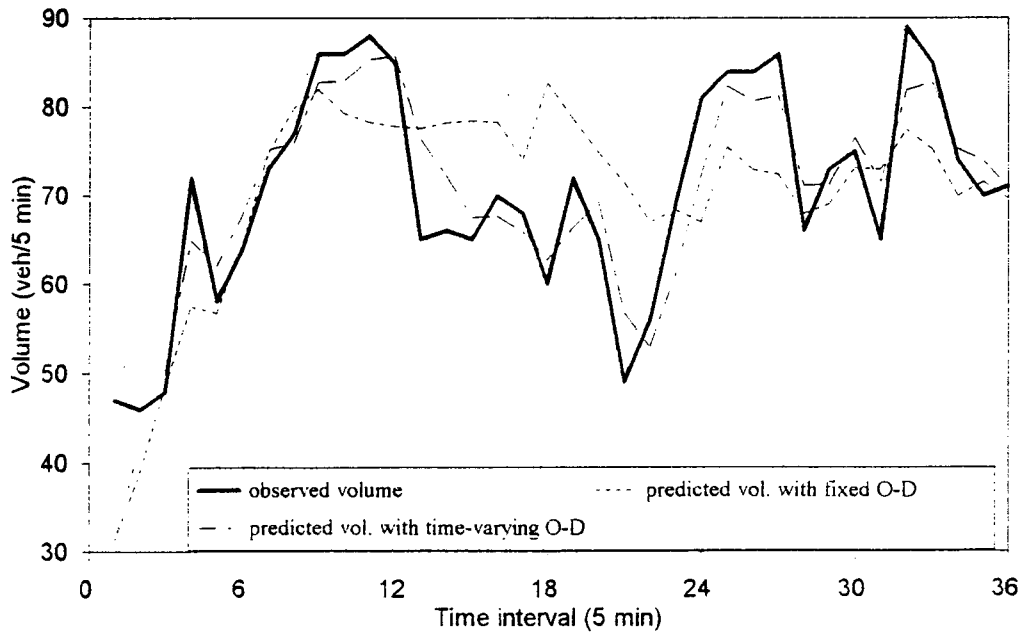
■ 통행패턴의 변동이 심한 도시고속도로에서 교통량예측 정확도를 높이기 위해서는 신뢰성 있는 교통류모형 뿐 아니라 동적O-D비율의 추정 알고리즘이 필수적이라고 결론지어진다.

<그림> 참조

<그림 > 3개의 기점과 2개의 종점을 가진 구간의 기하구조(I-35W)



<그림 > 관측교통량과 예측교통량의 시간대별 변화



V. 결론 및 향후 연구과제

1. 결론

■ 이 연구의 목적은 그 비중이 제고되고 있는 도시고속도로의 효율적인 이용을 위해 연속류 시뮬레이션모형을 개발하고 ATMS분야에 대한 적용방안을 개발하는데 있었다. 본 논문의 결과를 정리하면 다음과 같다.

■ 첫째, 제안된 도시고속도로 시뮬레이션 모형은 마코프교통류모형에 기반을 둔 것으로서 각 구간에서 통행목적지별 차량수를 추적할 수 있는 통행수요모형 기능에 구간내 이동을 동적으로 기술할 수 있는 거시적 교통류모형을 결합한 것이다.

■ 현장자료실험 결과 제안된 시뮬레이션모형은 비교적 간단한 모형구조에도 불구하고 고속도로 본선과 진출램프의 교통상황 변화를 효율적으로 기술 가능한 것으로 평가된다. 또한 제안된 모형은 ATMS 전략구축에 응용 가능할 것으로 보인다.

■ 본 논문에서 제안된 모수적응적 필터모형(parameter adaptive filtering model: PAF)은 각 링크의 목적지별 차량대수 $x_{kj}(t)$ 를 기본 상태변수로 설정하고 검지기 교통량 $y_d(t)$ 와 동적O-D비율 $b_{ij}(t)$ 를 추가상태변수로 도입한데 그 특징이 있다. PAF모형은 상태방정식으로 채용한 predictor-corrector형태의 확장된 칼만필터방식을 채용하여 prediction단계에서는 고속도로 본선과 진출램프의 예측교통량이 얻어지고 correction단계에서는 동적O-D와 목적지별 링크차량대수가 추정되도록 설계되어 있다.

■ PAF 모형평가 결과 링크교통량만으로 신뢰성 있는 실시간 O-D추정이 가능하였다. 현장자료실험 결과 고속도로 본선과 진출램프의 교통량을 신뢰성 있게 예측하기 위해서는 실시간 O-D추정기능이 예측모형에 필수적으로 포함되어야 할 것이다.

2. 향후 연구과제

■ 차선변경, 진입, 진출, 엇갈림에 따른 간섭 등에 따른 용량저하 현상을 보다 잘 반영할 수 있도록 추가 연구가 필요하다.

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

■ 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 본선

의 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.

■ 진입미터링 최적화방안을 마련하는 연구가 필요하다. 현재 세계적으로 통용되는 진입램프제어 방식은 고정식, 시간제변화식(TOD), 지역별 교통량감응식이 쓰이고 있다. 또한 LP를 활용한 시스템통합(System Integrated) 최적화방법도 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 시뮬레이션모형을 예측모형으로 채택한 최적진입제어 방식을 개발할 가능성이 있다.

■ 도시고속도로와 인접 도로의 연계운영방안을 평가할 수 있는 기능으로의 확장

참고문헌

Cascetta, E. and Nguyen, S. (1988) A unified framework for estimating or updating origin/destination matrices from traffic counts. *Transpn. Res.*, **22B**, 437-455.

Chang, G. L. and Wu, J. (1993) Recursive estimation of time-varying O-D Flows from traffic counts in freeway corridors. *Presented to Transpn. Rec.*

Cremer, M. and Keller, H. (1987) A new class of dynamic methods for the identification of origin-destination flows. *Transpn. Res.*, **32B**, 117-132.

Davis, G. (1993) Estimating freeway origin-destination parameters and impact of uncertainty on ramp control. *ASCE J. of Transportation Engineering*. Vol. **119**, No. 4, Jul./Aug., 489-503.

Davis, G. and Kang, J. G. (1994) Estimating destination-specific traffic densities on urban freeways for advanced traffic management. *Transpn. Res. Rec.*, **1457**, 143-148.

Euler, G. (1992) *Intelligent Vehicle Highway System in Traffic Engineering Handbook* (4th edition), Institute of Traffic Engineers, 448-463.

Nihan, N and Davis, G. (1989) Application of prediction-error minimization and maximum likelihood to estimate intersection O-D matrices from traffic counts. *Transpn. Science*, **23**, 77-90.

Nguyen, S. (1984) Estimating origin-destination matrices from observed flows. In M. Florian (Ed.) *Transportation Planning Models*. Elsevier Publishers, 363-380.

Numerical Algorithms Group (1986) *NAG workstation library, Version 1*. Oxford, UK.

Okutani, I. (1987) The Kalman filtering approaches in transportation and traffic problems, *Transpn. and Traffic Flow Theory* (Gartner, N.H. and Wilson, N.H.M., Editors), Elsevier Science Publishing Co., Inc.

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., 49-58.

Payne, H. J. (1979) FREFLO: A macroscopic simulation model of freeway traffic. *Transpn. Res. Rec.*, **722**, 68-77.

Stephanedes, Y. and Chang, K. (1993) Optimal control of freeway corridors, *ASCE Journal of Transpn. Engineering*. Vol. **119**, No. **4**, Jul./Aug., 504-514.