

## 도로지능화를 위한 교통축제어모형 개발에 관한 연구

A study on the development of a corridors control model  
in the framework of the ITS

김 동 선\*  
Kim, Dong Sun

### 要 旨

ITS 구축을 위한 고속도로축 통합최적제어모형은 진입램프미터링, 진출램프전환율 그리고 인접노면가로 g/C비 결정 등 3가지 제어 변수를 동시에 결정될 수 있도록 구축하였다. 또한 실시간 처리가 가능하도록 당초 비선형문제를 선형 문제로 전환하기 위해 교통량-밀도 관계식을 두 개의 선형함수로 축약하고, SLP알고리즘을 사용한 컴퓨터 알고리즘도 제안하였다.

### ABSTRACT

An integrated optimal control model has been formulated to address dynamic freeway diversion control process. The purpose of this paper is to develop an effective and efficient approach for simultaneously solving optimal control measures, including on-ramp metering rates, off-ramp diversion rates, and g/C ratios for traffic signals, on a real-time basis. By approximating the flow-density relation with a two-segment linear function, the non-linear optimal control problem can be simplified into a set of piece-wised linear programming models and solved with the proposed SLP algorithm. consequently, an effective on-line feedback method has been developed for integrated freeway corridor control in the framework of the ITS

### 1. 서론

고속도로시설을 최대한 이용할 수 있도록 첨단기법(전자,통신,제어,정보등)을 활용한 ITS기법들이 연구되고 있다. 특히, 고속도로 본선에서 유고발생시 비반복적 교통혼잡이 상당히 심각하기 때문에 이의 해소내지 완화를 위한 고속도로축 실시간 제어 전략 연구가 최근 상당히 진척되고 있다.

일반적으로 고속도로축은 고속도로 본선, 병행한

노면가로 그리고 연결로로 구성되며 이에 따른 통합 제어전략은 3가지 요소로 구성된다. 즉 (1) 진입램프미터링(on-ramp metering), (2) 진출램프전환(off-ramp diversion), (3) 노면교차로 신호설계이다. 그런데 진입램프미터링과 신호교차로 신호계획은 상당한 연구성과가 있어 왔으나 상대적으로 진출램프를 통한 전환제어는 별 연구 진척이 없었다. 실제로 유고 발생시 진입램프미터링만으로는 혼잡완화에 적절히 대응하지 못하고 진출램프를 통한 전환제어가 함께 이루어

\* 대전대학교 교통공학과 조교수

어질 때 고속도로측 통과교통은 최대가 되어 어느 정도 고속도로 혼잡을 완화할 수 있다고 하겠다. 고속도로측의 효율적인 교통류관리방안은 유고감지시 최적의 동적전환교통유율의 결정이 핵심사항으로 전체적인 고속도로측의 효과적인 제어는 진입램프미터링, 진출램프전환교통유율 그리고 노면가로 신호전략이 통합된 최적제어가 이루어질 때 비로소 가능하다고 하겠다.

기존 연구성과를 살펴보면, 우선 Cremer와 Schoof(1989)의 고속도로측 제어모형으로 오프라인 해(解)에 기초한 휴리스틱 온라인 제어 알고리즘을 제안하였다. Chang et al.(1993)은 동적 시스템-최적제어모형을 제안하였으나, 진출램프전환은 고려하지 못했다. 또한 Gartner 와 Reiss(1987), Reiss et al.(1978, 1981, 1991)도 다층제어구조전략구축에 공헌한 바 있으나 전환전략을 포함시키지 못했다. 또 Goldstain과 Kumar(1982), Papageorgiou(1980,1993), Papageorgiou et al.(1990) 그리고 Payne et al.(1985)등의 연구성과들도 고속도로 본선제어에만 국한된 것이다. 결과적으로 고속도로측의 최적제어는 세 가지 제어가 통합되어진 모형식이 우선적으로 구축되어지고 이들 모형식을 실시간으로 처리할 수 있는 컴퓨터알고리즘이 개발되어야 한다. 기개발된 알고리즘으로는 Cremer 와 Schoof(1989)의 것이 있는데 대규모의 비선형 혼합 정수 최적화 문제로 구성되어 있어 실시간 처리가 불가능하다. 따라서 통합최적제어모형을 2단계 최적화 과정, 즉 상위단계 수준의 노선전환, 하위수준의 램프미터링, 속도제한, 노면가로신호 등이 있다.

따라서 분석적 선형화기술로 비선형 모형을 어느 정도 다룰 수 있으나 상당량의 컴퓨터작업을 요구한다. 그래서 보다 효과적인 실시간 전환제어시스템을 풀 수 있는 알고리즘개발이 급선무라 하겠다. 본 논문의 목적은 통합된 유고-감응 고속도로측 제어시스템의 모든 상황을 묘사할 수 있는 선형 또는 몇 개의 선형결합모형으로 정식화하고 이를 푸는 컴퓨터알고리즘의 개발에 있다. 교통량-밀도관계를 두 개 선형 구간으로 보고 선형 최적제어모형을 개발하였다. 여기에는 진입램프미터링을, 진출램프전환을 그리고 노면 신호교차로의  $g/C$ 결정을 포함한다. 또한실시간으

로 제어변수를 처리할 수 있는 알고리즘도 개발하였다. 마지막으로 INTRAS를 사용하여 제안된 모형의 유용성을 검증하였다

## 2. 모형정립

### 2.1 개요

본 논문의 목적은 고속도로 본선, 인접노면 가로, 연결로 등을 함께 고려한 통합최적제어전략을 수립하는 것으로 여기에는 진입램프미터링을, 진출램프전환을, 인접노면가로 교차로에서의 신호시간결정등 3가지로 구성되며 고속도로측의 통합최적제어전략 수립을 위한 모형정식화 과정은 다음과 같다.

### 2.2 동적 시스템 구성

우선 일반적인 고속도로측을 대상으로 하여 여기서 1개구간은 일방향 고속도로 본선구간, 병행 인접 노면 가로 그리고 진출·입 램프 1쌍으로 이루어진다.

전체 축을  $N$ 개 구간으로 나누어 1개구간에는 1쌍의 진출·입 램프와 1개의 횡단노면 가로로 이루어지며 진출램프구간은 좌·우측 두 하위 시스템으로 나누어지며 각각의 병행노면가로구간은 3개 하위 구간 즉, 각 진입램프는 노면가로 교차로 상류부에 근접하고 거리는 거의 무시할 정도이며 노면 교차로와 인접 진출램프 상류부간의 거리도 상당히 짧아 그 구간 통행시간은 무시될 정도이며, 노면 차량대기행렬과 교통량전이 등이 가능하다고 가정한다.(그림 2.2 참조) 사 고등 유고시 상류 진입램프 미터링보다 진출램프로의 전환을 고려가 비반복적 혼잡제거에 보다 효과적이고 동시에 노면 교차로 신호주기 결정도 전체적 고속도로 교통측 혼잡완화에 보다 더 효과적 전략으로 볼 수 있으나 전체적으로 고속도로 통과교통량최대를 목적함수로 한 최적화문제 정식화를 위해 동적시스템 각 요소들의 동적 상호작용을 정식화하는 일이 우선 일차적 과제라 볼 수 있다. 또한 모든 연속변수들이 분석시간을 동일 시간간격으로 세분하여 전체분석시간  $T$  동안 분석되어진다. 고속도로측을 동적시스템으로 보고 사용된 변수, 파라미터의 기호 및 정의의 정 리해 보면 다음과 같다.

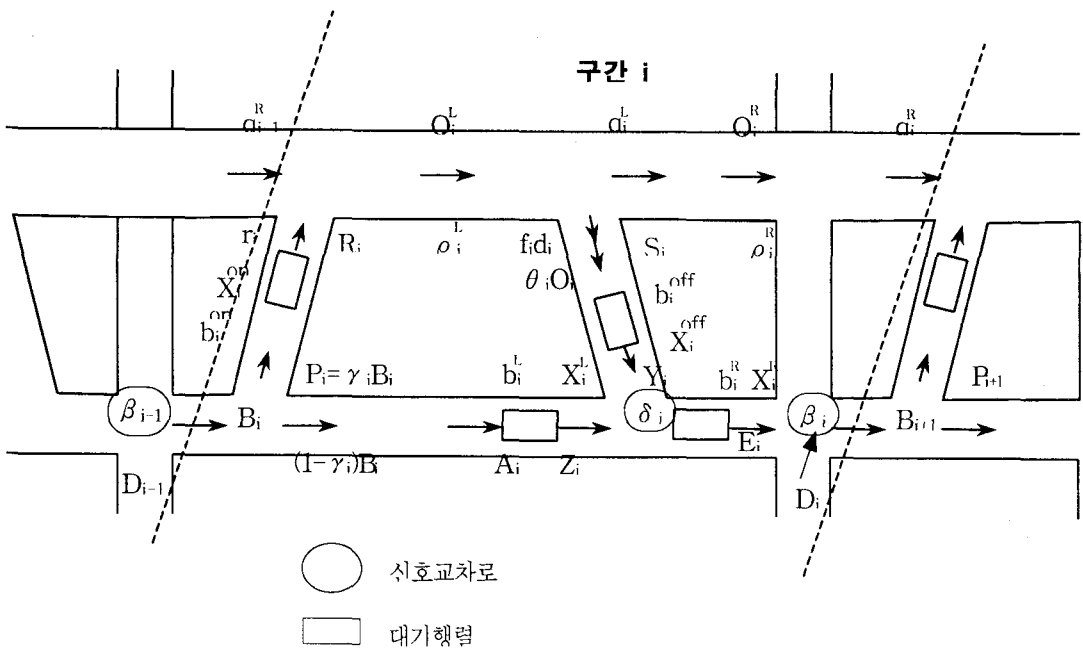
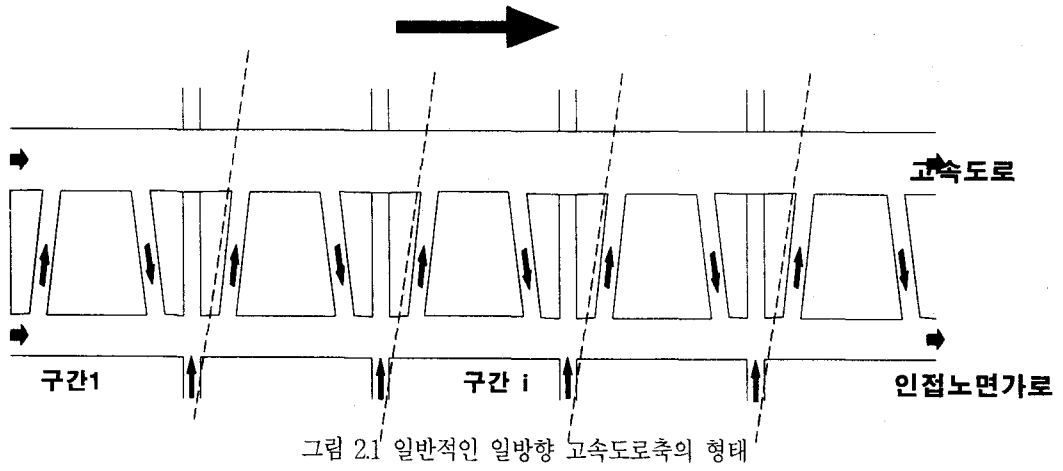


표 2.1 관련 동적 시스템 변수들의 정의

네트워크의 기하적, 물리적 데이터	
$L_i^L$	고속도로 본선구간 $i$ 의 좌측부분의 길이 (km)
$l_i^L$	고속도로 본선구간 $i$ 의 좌측부분의 차선수 (#)
$L_i^R$	고속도로 본선구간 $i$ 의 우측부분의 길이 (km)
$l_i^R$	고속도로 본선구간 $i$ 의 우측부분의 차선수 (#)
$L_i^s$	노면가로구간 $i$ 에서 노면가로길이 (km)
$u_i^L, v_i^L$	구간 $i$ 의 고속도로 좌측부분에서의 교통량-밀도 관계 파라메타
$u_i^R, v_i^R$	구간 $i$ 의 고속도로 우측부분에서의 교통량-밀도 관계 파라메타
$\rho^{cr}$	고속도로 본선상의 임계밀도 (veh/lane/km)
$\rho^{max}$	고속도로 본선상의 한계밀도 (veh/lane/km)
$V_i$	노면가로 구간 $i$ 에서 정상교통속도 (kph)
$R_i^{max}$	진입 램프 $i$ 에서의 최대미터링을
$R_i^{min}$	진입 램프 $i$ 에서의 최소미터링을
$b_i^{on}$	진입 램프 $i$ 에서의 허용되는 최대대기차량대수
$b_i^{off}$	진출 램프 $i$ 에서의 허용되는 최대대기차량대수
$b_i^R$	노면가로 $i$ 구간에서 우측부분상의 허용되는 최대대기차량대수
$b_i^L$	노면가로 $i$ 구간에서 좌측부분상의 허용되는 최대대기차량대수
$C_i^{off}$	진출 램프 $i$ 에서의 대기차량방출율(veh/green-hour)
$C_i^R$	노면가로 $i$ 의 횡단교차로상의 대기차량방출율
$C_i^L$	노면가로 $i$ 의 진출램프 인접교차로상의 대기차량방출율

동적 교통수요	
$q_o^R(k)$	시간간격 $k$ 동안 고속도로 $i$ 구간 상류부로 유입되는 교통유율(vph)
$B_i(k)$	시간간격 $k$ 동안 노면가로 $i$ 구간 상류부로 유입되는 교통유율(vph)
$D_i(k)$	시간간격 $k$ 동안 횡단 노면가로 $i$ 구간으로부터 진입하는 교통유율(vph)
$\theta_i(k)$	시간간격 $k$ 동안(전환교통량이 제외된)진출램프 $i$ 로부터 유출되는 교통량의 구성을
$\lambda_i(k)$	$D_i(k)$ 의 직진 교통량의 구성비

유고 데이터	
$\sigma_i^L(k)$	고속도로 본선 $i$ 구간 좌측부분상의 유고로 인한 용량감소요소(%)
$\sigma_i^R(k)$	고속도로 본선 $i$ 구간 우측부분상의 유고로 인한 용량감소요소(%)

교통량	
$q_i^L(k)$	시간간격 $k$ 동안 고속도로 본선 $I$ 구간 좌측부분에서 우측부분으로의 교통유율(vph)
$q_i^R(k)$	시간간격 $k$ 동안 고속도로 $i$ 구간에서 구간 $i+1$ 로 유입되는 교통유율(vph)
$Q_i^L(k)$	시간간격 $k$ 동안 고속도로 $i$ 구간 좌측부분상의 교통유율(vph)
$Q_i^R(k)$	시간간격 $k$ 동안 고속도로 $i$ 구간 우측부분상의 교통유율(vph)
$r_i(k)$	시간간격 $k$ 동안 진입램프 $i$ 로 부터 유입되는 교통유율(vph)
$s_i(k)$	시간간격 $k$ 동안 진출램프 $i$ 를 통해 유출되는 교통유율(vph) (전환교통량 포함)
$B_i(k)$	시간간격 $k$ 동안 노면가로 $i$ 구간 상류부로 유입되는 교통유율(vph)
$A_i(k)$	시간간격 $k$ 동안 진출램프 교차로로 진입하는 노면가로 $i$ 구간 좌측부분의 교통유율(vph)
$Z_i(k)$	시간간격 $k$ 동안 노면가로 $i$ 상의 진출램프 교차로로부터 방출되는 교통유율(vph)
$E_i(k)$	시간간격 $k$ 동안 노면가로 $i$ 상의 하류부로부터 방출되는 교통유율(vph)
$Y_i(k)$	시간간격 $k$ 동안 진출램프 $i$ 의 하류부에서 인접노면상으로 합류하는 교통유율(vph)
$P_i(k)$	시간간격 $k$ 동안 인접노면가로에서 진입램프 $i$ 로 유입하는 평균 교통유율(vph)
결정할 제어변수	
$R_i(k)$	시간간격 $k$ 동안 진입램프 $I$ 에서의 미터링율
$d_i(k)$	시간간격 $k$ 동안 진출램프 $i$ 상에서 정상회전 교통량을 배제한 전환 교통유율
$\delta_i(k)$	시간간격 $k$ 동안 진출램프 인접 교차로 $i$ 에서의 총 신호주기에 대한 g/C비
$\beta_i(k)$	시간간격 $k$ 동안 횡단가로 교차로 $i$ 의 총 신호주기에 대한 g/C비
시스템 파라미터	
$\gamma_i(k)$	시간간격 $k$ 동안 인접노면가로에서 진입램프 $i$ 로 유입하는 교통량구성비
$e_i(k)$	시간간격 $k$ 동안 진입램프 $i$ 에서 고속도로로 미터링율에 따라 유입되는 평균교통유율비
$f_i(k)$	시간간격 $k$ 동안 진출램프 $i$ 에서 산출된 전환율에 따른 실제 전환 교통유율비
$\alpha_i(k)$	노면가로 $i$ 구간상의 군분산파라미터(Platoon dispersion parameter)
$\eta_i(k)$	노면가로 구간 $i$ 에서 $i+1$ 로 직진하는 교통량비
$t_i(k)$	시간간격 $k$ 동안 노면가로 $i$ 구간 좌측 부분을 주행하는데 소요되는 평균 주행시간
상태 변수	
$\rho_i^L(k)$	시간간격 $k$ 동안 고속도로 본선 $i$ 구간 좌측부분의 평균밀도(veh/lane/km)
$\rho_i^R(k)$	시간간격 $k$ 동안 고속도로 본선 $I$ 구간 우측부분의 평균밀도(veh/lane/km)
$x_i^{on}(k)$	시간간격 $k$ 동안 진입램프 $i$ 상의 평균차량대수
$x_i^{off}(k)$	시간간격 $k$ 동안 진출램프 $i$ 상의 평균차량대수
$x_i^R(k)$	시간간격 $k$ 동안 노면가로구간 $i$ 의 우측부분의 평균차량대수
$x_i^L(k)$	시간간격 $k$ 동안 노면가로구간 $i$ 의 좌측부분의 평균대기차량대수

상기 정의된 변수들을 가지고 정식화된 동적시스템 모형식에서 최적 온라인 제어전략에 따라 변수인  $\{R_i(k), d_i(k), \delta_i(k), \beta_i(k)\}$  등을 결정하는 과정으로 우선 여기서 고속도로 하위시스템 3개대상구간에서의 변수 상호간의 동적 관련성들을 정식화해보면 다음과 같다.

2.3 동적 교통모형식

2.3.1 고속도로 본선상의 교통류의 동적 관련성

고속도로 본선구간  $i$ 에서 교통량-밀도 관계식을 평형상태에 도달할 경우 동적 밀도전개식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \rho_i^L(k) &= \rho_i^L(k-1) + \frac{T}{L_i^L L_i^L} [q_{i-1}^R(k) \\ &+ e_i(k)R_i(k) - f_i(k)d_i(k) \\ &- \theta_i(k)Q_i^L(k) - q_i^L(k)] \end{aligned} \quad 1 \leq i \leq N \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \rho_i^R(k) &= \rho_i^R(k-1) \\ &+ \frac{T}{L_i^R L_i^R} [q_i^L(k) - q_i^R(k)] \end{aligned} \quad 1 \leq i \leq N \quad (2.2)$$

여기서,  $e_i(k)R_i(k)$  :

진입램프로 유입되는 실제 교통유율

$f_i(k)d_i(k)$  :

진출램프로 유입되는 실제 교통유율

$\theta_i(k)Q_i^L(k)$  :

진출램프  $i$ 에서 유출되는 정상 교통유율

한편 인접구간간의 교통류의 동적 상호관련성을 전이 교통량으로 정식화하면

$$\begin{aligned} q_i^L(k) &= \frac{1}{2} [(1 - \theta_i(k))Q_i^L(k) \\ &- f_i(k)d_i(k) + Q_i^R(k)] \end{aligned} \quad 1 \leq i \leq N \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} q_i^R(k) &= \frac{1}{2} [Q_i^R(k) + Q_{i+1}^L(k) \\ &- e_{i+1}(k)R_{i+1}(k)] \end{aligned} \quad 1 \leq i \leq N-1 \quad (2.4-1)$$

$$q_N^R(k) = Q_N^R(k) \quad (2.4-2)$$

으로 표현된다.

(2.1), (2.2)식은 비선형식이나 계산상의 간편성을 위해 선형관계로 근사화시키면 그림 2.1 에서 보는 바와 같이 이분할 선형함수로 구성되며 이때의 관계식은

$$\begin{aligned} Q_i^L(k) &= [v_i^L(\rho) \\ &+ u_i^L(\rho) \cdot \rho_i^L(k)] \sigma_i^L(k) \end{aligned} \quad 1 \leq i \leq N \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} Q_i^R(k) &= [v_i^R(\rho) \\ &+ u_i^R(\rho) \cdot \rho_i^R(k)] \sigma_i^R(k) \end{aligned} \quad 1 \leq i \leq N \quad (2.6)$$

으로 쓸 수 있다.

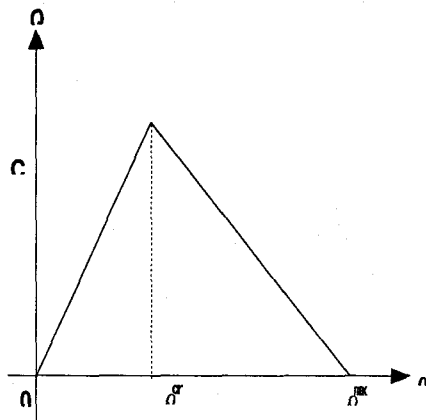


그림 2.3 2분할 선형 교통량-밀도 모형

2.3.2 램프상의 교통류의 동적 관련성

램프상의 교통류의 동적 교통상태는 "Robertson's platoon dispersion model(1969)" 를 이용하여 진입램프 대기차량행렬길이의 동적성을 수식으로 표현하면

$$x_i^{on}(k) = x_i^{on}(k-1) + [\gamma_i(k)B_i(k) - e_i(k)R_i(k)]T \quad 1 \leq i \leq N \quad (2.7)$$

으로 되며 또한 진출램프상의 대기차량 행렬길이의 동적성도 동일한 방법으로 수식화하면 다음과 같다.

$$x_i^{off}(k) = x_i^{off}(k-1) + [f_i(k)d_i(k) + \theta_i(k)Q_i^L(k) - Y_i(k)]T \quad 1 \leq i \leq N \quad (2.8)$$

한편 평균 진출램프 방출교통량인  $Y_i(k)$ 의 결정은 시스템변수인  $\{\delta_i(k)\}$ 에 따라 이루어지는데 이때 결정식은 다음과 같다.

$$Y_i(k) = \min \left\{ [1 - \delta_i(k)]C_i^{off}, \frac{x_i^{off}(k-1) + [f_i(k)d_i(k) + \theta_i(k)Q_i^L(k)]T}{T} \right\} \quad 1 \leq i \leq N \quad (2.9)$$

2.3.3 노면가로상의 교통류의 동적 관련성

유교에 따른 대기차량행렬이 노면가로  $i$  상에서 진출램프 연결 교차로 하류부와 횡단 가로 교차로에서 발생되며 이때, 신호주기는 2현시 신호로 가정하고 두 가지  $g/C$  비를  $1 - \delta_i(k)$ ,  $\beta_i(k)$ 의 시스템변수 값의 제어로 결정되는데 "platoon dispersion factor"를 고려한 관계식을 (예; Robertson, 1969; Axhausen과 Kurling, 1987) 정식화하면 다음과 같다.

$$A_i(k) = [1 - \alpha_i(k)]B_i(k) + \alpha_i(k)A_i(k-1) \quad 1 \leq i \leq N \quad (2.10)$$

여기서,

$$B_i(k) = [1 - \gamma_i(k) - t_i(k)]B_i(k - t_i(k)) \quad 1 \leq i \leq N \quad (2.11)$$

$$t_i(k) = \text{integer} (= 0.8t_i(k)/T)$$

또한 (2.7)-(2.8)식과 유사하게 대기차량행렬길이의 동적성을 수식화해보면 다음과 같다.

$$x_i^L(k) = x_i^L(k-1) + [A_i(k) - Z_i(k)]T \quad 1 \leq i \leq N \quad (2.12)$$

$$x_i^R(k) = x_i^R(k-1) + [Z_i(k) + Y_i(k) - E_i(k)]T \quad 1 \leq i \leq N \quad (2.13)$$

(2.9)식과 동일하게 방출교통량을 수식으로 쓰면 다음과 같다.

$$Z_i(k) = \min \left\{ \delta_i(k)C_i^L, \frac{x_i^L(k-1) + A_i(k)T}{T} \right\} \quad 1 \leq i \leq N \quad (2.14)$$

$$E_i(k) = \min \left\{ \beta_i(k)C_i^R, \frac{x_i^R(k-1) + [Z_i(k) + Y_i(k)]T}{T} \right\} \quad 1 \leq i \leq N \quad (2.15)$$

따라서 인접노면 교차로상의 교통량의 동적성을

교통량 보전법칙에 따라 수식으로 쓰면 다음과 같다.

$$B_{i+1}(k) = D_i(k)[1 - \lambda_i(k)][1 - \beta_i(k)] + \eta_i(k)E_i(k) \quad 1 \leq i \leq N \quad (2.16)$$

여기서,

$D_i(k)[1 - \lambda_i(k)]$ : 시간간격  $k$ 동안 횡단간격  $I$ 로부터 고속도로로 진입하는 교통류를  
 $[1 - \beta_i(k)]$ : 횡단가로  $I$ 상의  $g/C$ 비

### 2.4 실시간 유고감응식 제어접근방법의 기본틀

#### 2.4.1 동적 시스템 전개

그림 2.2 를 예로 전체 고속도로축상의 교통류의 동적 상태를 행렬 형태로 축약해 쓰면 다음과 같다.

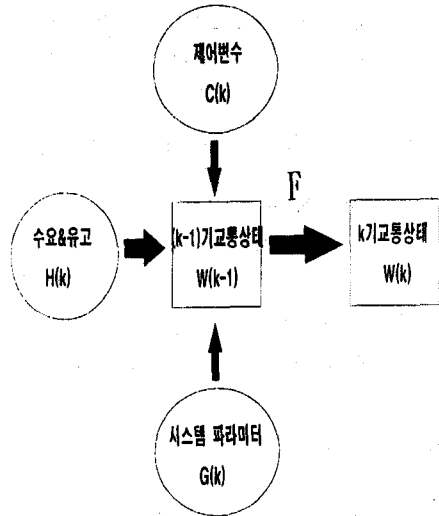


그림 2.4 동적 교통상태 전개체계

$$W(k) = F[W(k-1), C(k), G(k), H(k)]$$

여기서,

$$W(k) \equiv \{ \rho_i^L(k), \rho_i^R(k), x_i^{on}(k), x_i^{off}(k), x_i^L(k), x_i^R(k) \mid \text{for all } i \}$$

시간간격  $k$ 에서의 상태변수

$$C(k) \equiv \{ R_i(k), d_i(k), \delta_i(k), \beta_i(k) \mid \text{for all } i \}$$

최적화될 제어변수

최적화될 제어변수

$$G(k) \equiv \{ \gamma_i(k), e_i(k), f_i(k), \alpha_i(k), \eta_i(k), t_i(k) \mid \text{for all } i \}$$

시간중속적 시스템 모형 파라메타

시간중속적 시스템 모형 파라메타

$$H(k) \equiv \{ D_i(k), \lambda_i(k), \theta_i(k), \sigma_i^L(k), \sigma_i^R(k) \mid \text{for all } i \}$$

실시간 통행수요패턴 및 유고정보

실시간 통행수요패턴 및 유고정보

$F$  : (2.11)-(2.16)식에 의해 결정될 함수

여기서 실시간 제어의 기본 알고리즘 흐름도는 그림 2.3 에서 보는 바와 같다.

실시간 최적제어를 위한 최적화문제 구성에서 목적함수로는 우선 운영입장에서보면 최소 총주행시간, 지체 · 차량-시간 · 차량-km · 오염방출의 최소화 등을 들 수 있으나 전체 고속도로축상의 통과교통량의 최대화를 MOE로 선정하고 제약식은 (2.1)-(2.16)식, 그리고 경계조건 제약식으로 구성된다. 먼저 최대통과교통량식은

$$\sum_k \{ \sum_{i=1}^N \{ [1 - \eta_i(k)] E_i(k) + [1 - \beta_i(k)] \lambda_i(k) D_i(k) \} T + [q_N^R(k) + B_{N+1}(k)] T \} \quad (2.17)$$

으로 나타낼수 있다.

또한 경계조건 제약식은 다음과 같다.



$$1 \leq i \leq N \quad (2.20)$$

-미터링을

$$R_i^{\min} \leq R_i(k) \leq R_i^{\max} \quad 1 \leq i \leq N \quad (2.18)$$

### 3. 컴퓨터알고리즘개발

구축된 동적시스템 모형식으로 부터

-전환교통량

$$0 \leq d_i(k) \leq C_i^{\text{off}} - \theta_i(k)Q_i^L(k) \quad 1 \leq i \leq N \quad (3.1)$$

-대기행렬길이

$$0 \leq x_i^{\text{on}}(k) \leq b_i^{\text{on}} \quad 1 \leq i \leq N \quad (3.2)$$

$$0 \leq x_i^{\text{R}}(k) \leq b_i^{\text{R}} \quad 1 \leq i \leq N \quad (3.3)$$

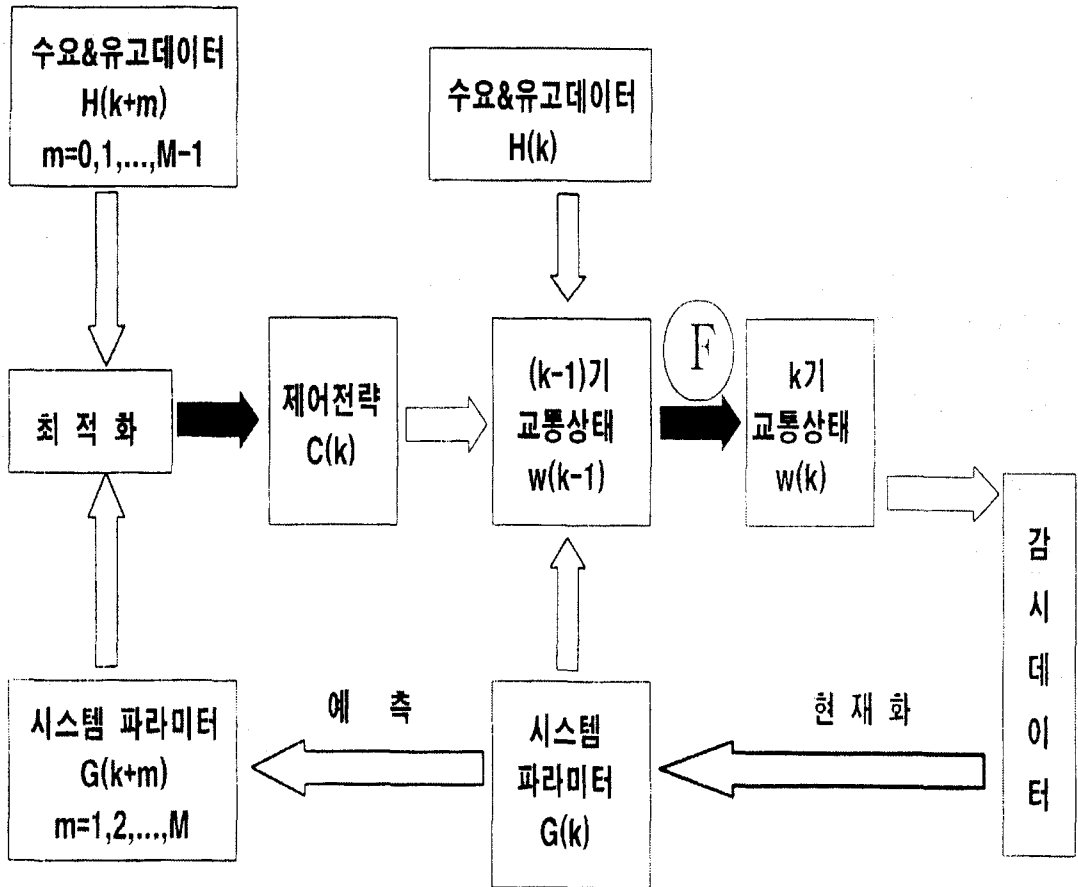


그림 25 실시간 고속도로축 제어논리 흐름도

-신호주기상의g/c비

$$0 \leq \delta_i(k) \leq 1$$

$$1 \leq i \leq N \quad (3.4)$$

$$0 \leq \beta_i(k) \leq 1$$

$$1 \leq i \leq N \quad (3.5)$$

이를 푸는 실시간 알고리즘은 다음의 선행과정을 수반하게 된다. 기 구축된 (2.17)-(3.5)식들은 근본적으로 NLP 문제로서, 교통량-밀도 관계를 선형함수로 변형적용함으로써 실시간으로 처리할 수 있는 SLP(Successive Linear Programming)알고리즘을 적용하여 처리하였다.

### 3.1 SLP 알고리즘

#### step 1

- 직전 교통상태 W(k-1), 제어 관측치 C(k-1)에 따라 (2.5),(2.6),(2.9),(2.14),(2.15)식들에서 적절한 선형 구간을 선택함.
- NLP모형을 LP모형으로 변환하기위해 2개 선형함수로 변환함.
- LP모형을 풀고 C(k)를 구함.

#### step 2

- C(k)로부터 W(k)를 구함.

#### step 3

- (2.5),(2.6),(2.9),(2.14),(2.15)식 중에서 k기의 W(k), C(k)에서 산출된 값들을 (k-1)기에서와 同一한 값을 갖는지를 비교하고, 변화가 없으면 C(k)값을 최적해로함.

그렇지 않으면 step 4 로 넘어감.

#### step 4

- 부등제약식들을 변화시켜 상기식들에서 계산을 다시 수행함.
- 수정한 LP모형을 풀고 새로운 C(k)를 산출함.

#### step 5

- 목적함수(전체 통과교통량 최대화)가 향상되었는지 확인하고 변화없으면, C(k)를 최적해로 함. 그렇지 않으면 step 2 로 돌아감.

고속도로측 전제통과차량을 최대화 되도록 구성된 최적화문제의 제어논리과정을 다음 그림 3.1 에서 제시하고 있다.

### 3.2 계산예

다음의 예제 고속도로측에서 시뮬레이션한 결과 (INTRAS프로그램 사용)들을 요약·정리하면 다음과 같다.

#### 3.2.1 전제사항

- 4개 구간으로 구성됨.
- 하나의 구간은 2차선 고속도로본선, 부가차선, 3차선 신호가로, 1개 진입램프와 1개 진출램프. 그리고 1개 횡단노면가로 구성됨.
- 3분 시간간격을 1개 시간간격으로 전체 20개 시간간격(총60분)에서 시뮬레이션함.
- 2번째 구간 고속도로 본선 하류부에서 3-8번째 시간간격 동안(18分) 유고발생함.

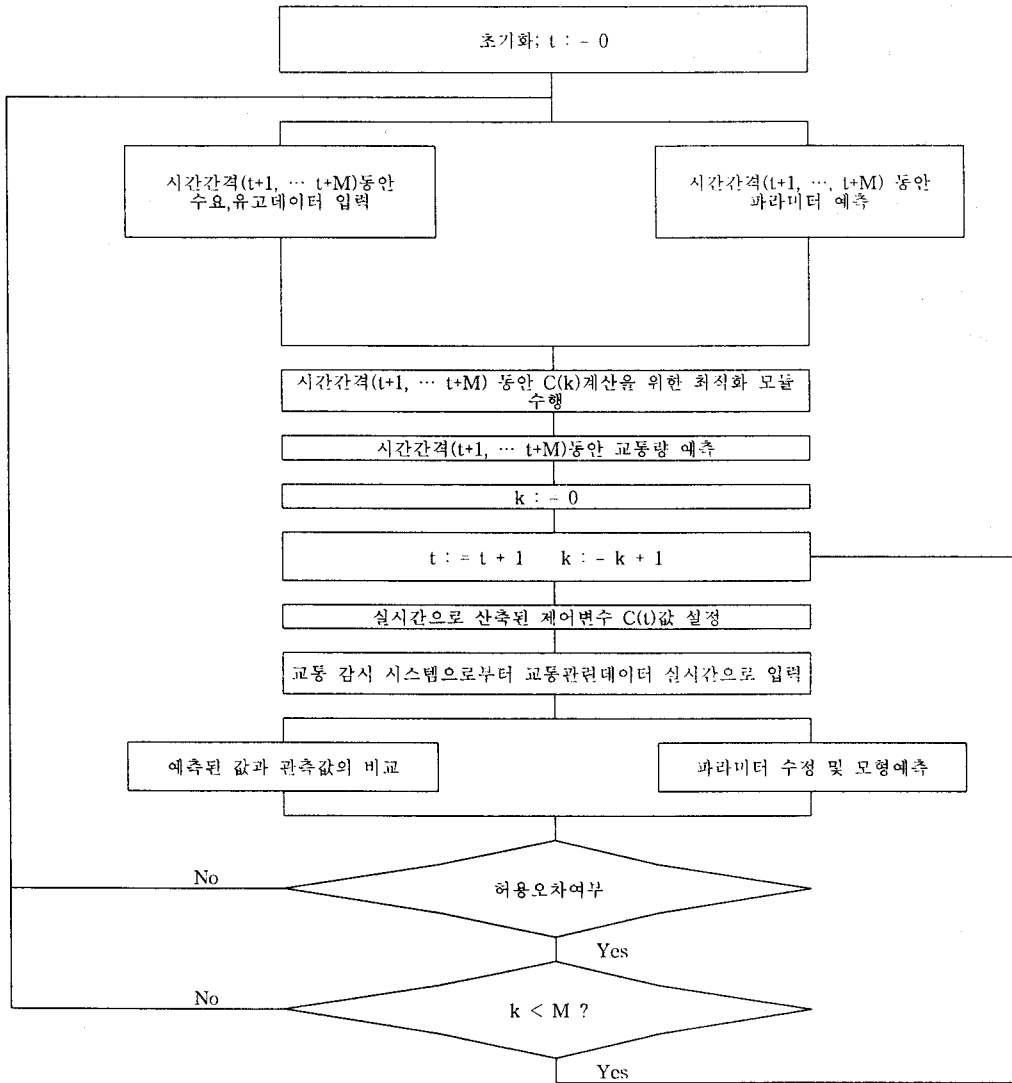


그림 3.1 실시간 피드백 제어논리

사례 설계

- 사례 1: 비교적 많은 고속도로 본선통행량(3600vph), 심각한 유고발생(용량 50%감소)
- 사례 2: 비교적 적절한 고속도로 본선통행량(3000vph), 심각한 유고발생(용량 50%감소)
- 사례 3: 비교적 적은 고속도로 본선통행량(2400vp

- h), 가벼운 유고발생(용량 20%감소)
  - 노면가로 통행량 1000vph
  - 횡단가로 통행량 400vph (이중 25%가 우회전 차량)
- 4개 시나리오 작성
- 시나리오-1: 제어실시하지 않은 경우
- 시나리오-2: 제안된 제어전략을 수행한 경우

시나리오-3: 제어A (비교적 적절한 제어)

시나리오-4: 제어B (비교적 강력한 제어)

제어 A,B의 제어전략 내용을 Case별로 설명하면 다음과 같음.

사례1: 제어A-좌측 두개 진입램프 차단  
좌측 두개 진출램프로 본선

교통량 10% 전환

제어B-좌측 두개 진입램프 차단  
좌측에서 두 번째 램프에서  
본선교통량 20% 전환

사례2: 제어A-좌측 2개 진입램프 차단  
좌측2번째 진출램프로 10%

교통량전이

제어B-좌측 2개 진입램프 차단  
좌측 2번째 진출램프로 20%

교통량전이

사례3: 제어A-좌측 2번째 진입램프만 차단  
제어B-좌측 2번째 진입램프만 차단  
좌측 2번째 진출램프로 5%

교통량전환

· 모든 전환교통량은 가장 가까운 하류부 진입램프로 재진입, 인접 진입램프수요가 용량에 도달하면 노면가로를 통해 다음 진입램프에서 재진입한다고 가정했음.

### 3.2.2 시뮬레이션 결과

· INTRAS 프로그램 수행결과는 아래 표 3.1 과 같음.

표 3.1 전체 통과 차량수

시나리오	Case 1		Case 2		Case 3	
	통과 차량 수	증가분*	통과 차량 수	증가분*	통과 차량 수	증가분*
비제어	751	0	661	0	571	0
제어 A	757	5	662	11	575	4
제어 B	757	5	660	0	577	6
실시간제어(본연구결과)	787	35	684	23	608	37

주 : 증가분\*은 비제어를 기준으로 비교한 수치임.

보여주고 있으며 전체 시간대에서 비슷한 수준을 보여줌.

· 3개 제어 시나리오가 비제어때 보다(Case 2 제 B만 예외) 전반적으로 좋은 결과를 나타내고 있음.

## 4. 결론

본 ITS 구축을 위한 도로 지능화 방안의 일환으로 연구된 논문을 통해 도출된 연구성과를 요약·정리해보면 다음과 같다.

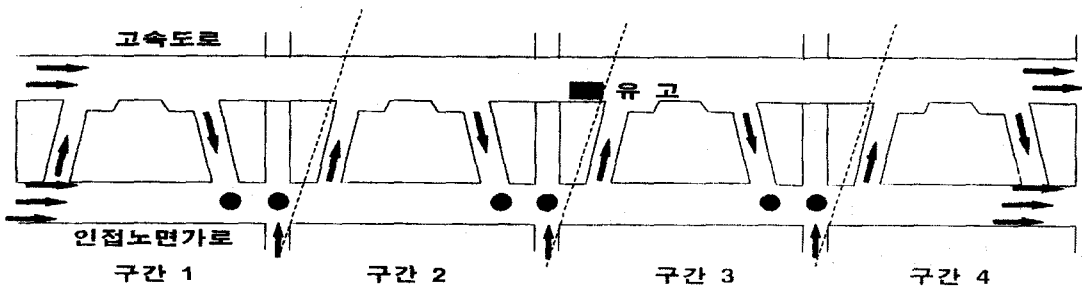


그림 3.2 예시 고속도로측

· 실시간 유고제어를 위해 고속도로 전환전략에 입각하여 진입램프리미팅, 진출램프리전환율, 노면가로 g/C 比 결정 등을 통합제어 할 수 있는 동적시스템-최적 제어 모형을 개발하였음.

· 실시간 처리가 가능하도록 교통량-밀도 관계식을 두개의 선형함수로 수정하여 SLP알고리즘을 적용하였음.

· INTRAS를 통해 시뮬레이션한 결과 비교적 만족할 만한 결과를 도출하였음.

한편 향후 연구과제를 제시해보면 다음과 같다.

· 첨단 신신호 제어전략을 신호노면교차 로에 접목시키고 보다 복잡한 노면가도로 확장할 수 있는 가능성 모색.

· 일관된 제어전략이 고속도로와 노면가 로에 동시에 적용될 수 있도록 보다 지 속적 연구가 필요함.

· 통합된 도로 지능화 방안을 효율적으로 구축하기 위해 타분야(통신, 제어, GIS)와의 공동연구가 지속되어야 함.

## 감사의 글

이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Axhausen K. W. and H.-G. Korling (1987) Some measurements of Robertson's platoon dispersion factor. Transportation Research Record 1112, TRB.
2. Banks J. H. (1989) Freeway speed-flow-concentration relationships: More evidence and interpretations, Transportation Research Record 1225, TRB.
3. Boillot F. et al. (1992) Optimal signal control of urban traffic networks. Proceedings of 6th International Conference on Road Traffic Monitoring and Control, IEE, London.
4. Box G. F. P. and G. M. Jenkins (1976) Time

- Series Analysis, Forecasting and Control, Holden Day, San Francisco.
5. Chang G. L. and Chen C. H. (1991) A dynamic model for real-time network O-D matrix estimation. Working paper, The University of Maryland, College Park, Maryland.
6. Chang G. L. and Chin C. S. (1991) System-optimum control in commuting corridors with in-vehicle navigation systems. Working paper, The University of Maryland, College Park, Maryland.
7. Chang G. -L., Ho P. -K. and Wei C. -H. (1993) A dynamic system-optimal control model for commuting traffic corridors, Transportation Research -C, Vol. 1C, pp 1-12
8. Cremer M. and S. Schoof (1989) On control strategies for urban traffic corridors. Proceedings of IFAC Control, Computers, Communications in Transportation. Paris.
9. Cremer M. and S. Fleischmann (1987) Traffic responsive control of freeway networks by a state feedback control. In Gartner and Wilson (Eds.), Transportation and Traffic Theory. Elsevier Science Publishing, New York.
10. Davis G. and N. Nihan (1989) An application of a nonparametric regression technique to short-term freeway traffic forecasting. ASCE Journal of Transportation Engineering.
11. Gartner N. H. and R. A. Reiss (1987) Congestion Control in Freeway Corridors: The IMIS System, in Odoni A. R. et al. (Eds.), Flow Control of Congested Networks, Springer-Verlag.
12. Gartner N. H. (1983), OPAC: A demand-responsive strategy for traffic signal control, Transportation Research Record 906, TRB
13. Goldstain N. B. and K. S. P. Kumar (1982), A decentralized control strategy for freeway regulation, Transportation Research, -B, Vol. 16B, pp 279-290

14. Hall F. L. et al (1986), Empirical analysis of freeway flow-density relationships, Transportation Research -A, Vol. 20A, pp 197-210
15. Henry J. J. et al. (1983) The PRODYN real time traffic algorithm, 4th IFAC -IFIP-IFORS Conference on Control in Transportation Systems, Germany, Baden-Baden 307.
16. Lieu H. (1993) An integrated diversion control system for freeway corridors. Ph. Dissertation. Department of Civil Engineering, University of Maryland, College Park.
17. Lu J. (1991) Prediction of traffic flow by an adaptive prediction system. Transportation Research Record 1287, TRB.
18. Martin P. T. and M. C. Bell (1992) Network programming to derive turning movements from link flows, Presented at the 71st Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington D. C.
19. Papageorgiou M. et al (1990) Modeling and real time control of traffic flow on the southern part of Boulevard Peripherique in Paris: Part II: coordinated on-ramp metering, Transportation Research -A, Vol 24A, pp 361-370
20. Papageorgiou M. (1990a) Modelling and real-time control of traffic flow on The Southern Part of Boulevard Peripherique in Paris: Part I: Modelling. Trnspon Res., 24A, 5, 345-359.
21. Papageorgiou M. (1990b) Dynamic modelling, assignment, and route guidance in traffic networks. Trnspon Res., 24B, 471-495.
22. Papageorgiou M. (1983) A hierarchical control system for freeway traffic, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-29, pp 482-490
23. Papageorgiou M. (1980) A new approach to time-of-day control based on a dynamic freeway traffic model, Transportation Research - B, Vol. 14B, pp 349-360
24. Payne H. J. et al (1985) Demand Responsive Strategies for Interconnected Freeway Ramp Control Systems, Vol. 1: Metering strategies. Verac Inc.
25. Payne H. J. and Thompson W. A. (1974) Allocation of freeway ramp metering volumes to optimize corridor performance. IEEE Trans. on Automatic Control 19, 177-186.
26. Reiss R. A., et al. (1978) Development of Traffic Logic for Optimizing Traffic Flow in an Intercity Corridor. Final Report under Contract DOT-FH-11-8738. U.S. Department of Transportation, Washington D. C.
27. Reiss R. A., et al. (1981) Algorithm development for corridor traffic control. In Traffic, Transportation, and Urban Planning (Vol.2), George Goodwin, London.
28. Reiss R. A., et al. (1991) Dynamic control and traffic performance in a freeway corridor: A simulation study, Transpn. Res. -A, Vol. 25A, pp 267-276.
29. Robertson D. I. (1969) TRANSYT: A traffic network study tool, Road Research Laboratory Report No. LR 253, Crowthorne, England.
30. Shaw L. (1972) On optimal ramp control of traffic jam queues. IEEE Transactions on Automatic Control, Ac-17, 5, 630-637.
31. Spiess H. (1990) Conical volume-delay functions. Transportation Science, 24, 153-158.
32. Stephanedes Y. J. et al. (1991) Online diversion prediction for dynamic control and vehicle guidance in freeway corridors, Transportation Research Record 1287, TRB.
33. Wattleworth J. A. (1965) Peak-period analysis and control of a freeway system. Highway Research Record, 157, 1-21.
34. Webster F. V. (1958) Traffic Signal Setting. Technical Report, Road Research Technology, Paper 39, London.

35. Wicks D. A. and Lieberman E. B. (1980) Developing and testing of INTRAS, a microscopic freeway simulation model, Vol. 1-4, Report No. FHWA/RD-80/106-109, KLD Associates, Inc.
36. Wu J. (1993) Development and evaluation of real-time ramp metering algorithms. Research report of GRF project, IVHS research division, Federal Highway Administration.
37. Willsky. A. S., E. Y. Chow. S. B. Gershwin. C. S. Greene. P. K. Houpt and A. L. Kurkjian (1980): Dynamic model-based techniques for the detection of incidents on freeways.-IEEE Trans. on Automatic Control. AC-25, No 3.