

■ 論 文 ■

도시고속도로축의 유고감응 동적제어모형의 구축

An Incident-Responsive Dynamic Control Model for Urban Freeway Corridor

유 병 석

(서울대학교 도시공학과 박사과정)

박 창 호

(서울대학교 지구환경시스템공학부 교수)

전 경 수

(서울대학교 지구환경시스템공학부 교수)

김 동 선

(대진대학교 도시공학과 교수)

목 차

I. 서론

- 1. 연구의 배경 및 목적
- 2. 연구의 방법 및 내용

II. 이론적 고찰

III. 모형 구축

- 1. 시스템 기술
- 2. 동적통합제어모형 구축
- 3. 실시간 제어를 위한 틀

IV. 모형의 검증

- 1. 시나리오 구성
- 2. 모형의 해찾기
- 3. 시뮬레이션 선택
- 4. 시뮬레이션 결과 분석

V. 결론 및 향후연구과제

참고문헌

요 약

도시고속도로축은 도시고속도로와 운전자가 대체도로로 이용할 수 있는 인접도로로 구성된 가로망을 말한다. 고속도로에서 사고나 극심한 혼잡으로 인해 지체가 생길 경우 단순히 진입램프에서 램프미터링만을 실행하는 것이 아니라 인접도로로의 경로전환을 통해 도시고속도로축의 효율을 극대화할 수 있다. 이는 지능형교통체계(ITS)에서 고려하고 있는 경로안내시스템과도 결부된다.

그러므로, 도시고속도로축에서는 진입램프에서의 램프미터링전략과 진출램프에서의 경로전환전략, 인접도로에서의 신호최적화전략을 통한 제어를 실행할 수 있다. 그러나, 이를 통합한 제어전략은 아직 고려되고 있지 못하다.

따라서, 본 연구에서는 도시고속도로에서의 진입램프미터링과 진출램프를 통한 경로전환, 인접도로에서의 신호시간조정을 통합한 제어모형을 구축하였으며, 통합제어모형은 적정 제어변수의 값을 구하기 용이하게 하기 위해 선형 형태로 구성하였다. 본 통합제어모형은 기존의 선형계획법을 이용하여 제어변수의 값을 쉽게 구할 수 있으며, MPL(버전 4.0)을 이용하여 문제를 풀었다. 또한, 시뮬레이션(TSIS 4.01)을 통해 통합제어모형과 알 고리즘의 우수성을 검증하였다.

1. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

주요한 교통흐름이 있는 도시고속도로와 운전자가 대체도로로 이용할 수 있는 인접도로가 서로 연결된 도로형태를 도시고속도로축이라 한다.

도시고속도로축에서의 도로망의 효율을 극대화하기 위해서 시행되고 있는 제어기법으로는 고속도로 진입 램프에서의 램프미터링과 인접도로에서의 신호시간조정 등을 들 수 있다.

고속도로에서 사고나 극심한 혼잡으로 인해 지체가 생길 경우 단순히 진입램프에서 램프미터링만을 실행하는 것이 아니라 대체 가능한 인접도로로의 경로전환을 통해 고속도로교통축의 효율을 극대화할 수 있다. 이는 지능형교통체계(ITS: Intelligent Transportation System)에서 고려하고 있는 경로안내시스템과 결부된다.

이에 본 연구에서는 도시고속도로축에서 도로망의 효율을 극대화할 수 있는 통합 모형을 구축하는 것을 목적으로 한다.

2. 연구의 방법 및 내용

도시고속도로축은 고속도로, 인접도로, 진입램프, 진출램프, 지선도로로 구성된다. 이 부분에 대한 제어로는 진입램프에서의 램프미터링(on-ramp metering), 진출램프에서의 경로전환(off-ramp diversion), 인접도로에서의 신호시간 조정(signal timing)등을 들 수 있다.

본 연구에서는 도시고속도로축에서 이들 구성요소들을 포함하는 모형을 구축하고, 이 모형을 풀기 위한 해 찾기 알고리즘에 대해 알아본 후, 이를 시뮬레이션 모형(TSIS: Traffic Software Integrated System)을 통하여 검증하도록 한다.

도시고속도로축 제어를 위해서는 수요를 예측하고, 이 수요와 도시고속도로축의 교통류 특성에 근거해 제어변수들에 대한 제어치를 얻어내게 된다. 또한 제어에 앞서 고속도로에서의 유고나 지체를 감지할 수 있어야 한다. 그러나, 본 연구에서는 그러한 자료의 취득이 어려운 관계로 시뮬레이션을 통하여 모형의 효용성을 검증하도록 하겠다. 먼저, 몇 개의 구간을 가진 가로망을 가정하고, 교통축에서의 수요를 가정

하여 시뮬레이션을 실시한다. 시뮬레이션 과정에서 얻어지는 가로망의 교통류 특성치에 근거해 본 모형을 적용하도록 한다.

II. 이론적 고찰

Reiss, Garner, Cohen(1991)의 연구에서는 도시고속도로축에 대한 전반적인 제어구조에 대해서 자세히 언급하고 있다. 도시고속도로축의 제어에 필요한 제반 구성요소들을 정리하고 제어에 있어 위계를 두어 제어를 하였다.

그러나, 진입램프에서의 램프미터링, 진출램프의 경로전환, 인접도로에서의 신호최적화를 개별 모형으로 다룸으로써 전체적인 통합제어의 성격을 띠지 못하는 것이 문제점이다.

Papageorgiou(1995)의 연구에서는 store-and-forward 기법에 근거해 선형 모형을 제시하였다. 그러나, 모형의 제시에만 그치고 해 찾기 알고리즘에 대해서는 제시하지 않았다.

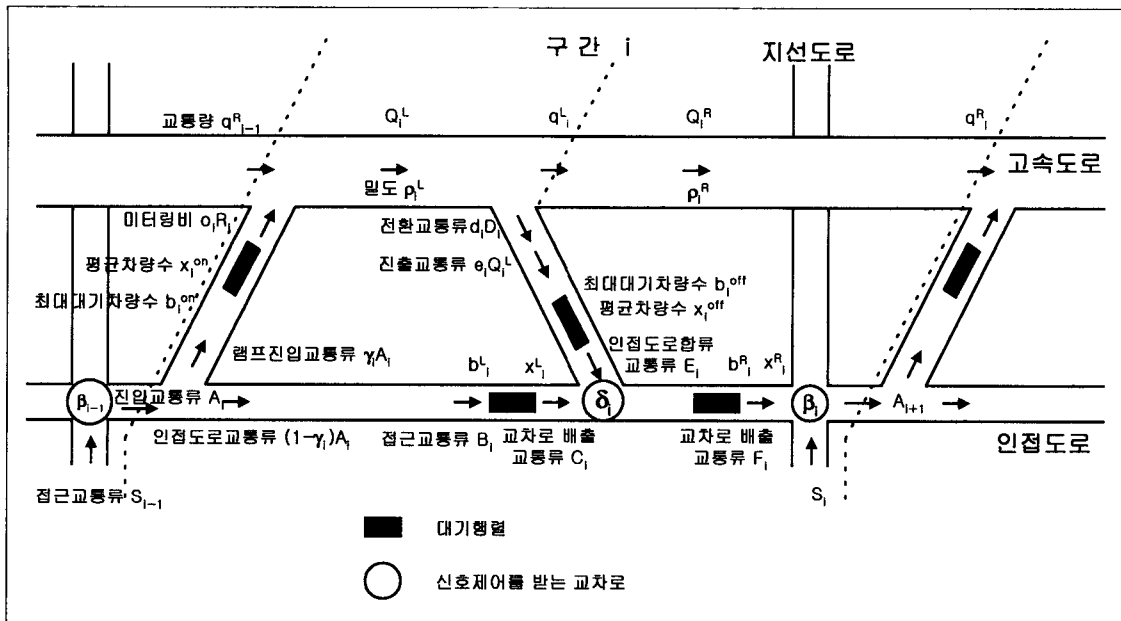
Chang, Ho, Wei(1993)의 연구에서는 시스템에서의 지체를 최소화하는 것을 목적함수로 잡았다. 모형에서의 지체식이 비선형이기 때문에 이를 1차 미분하여 선형식으로 근사하여 모형을 구축하였다. 그러나, 비선형을 선형으로 전환하는 과정에서 오차가 커질 우려가 존재한다. 또한, 고속도로에서의 유고시 경로전환이 고려되어 있지 못한 것이 문제점이다.

Chang, Wu, Lieu(1994)의 연구에서는 고속도로에서의 유고를 고려한 도시고속도로축의 통합제어 모형을 구축하였다. 그러나, 문제를 선형화시키는 과정에서 인접도로의 신호결정시 신호로 인한 모형의 비선형성이 존재한다는 것을 무시하고 선형으로 문제를 구축하였다. 또한, 고속도로에서 교통량과 밀도를 모형화 시키는 과정에서 고속도로의 차로수를 모형에 반영하지 못한 문제점도 있다.

III. 모형 구축

1. 시스템 기술

도시고속도로축은 고속도로, 인접도로, 지선도로로 구성되며, 그 기하구조와 시스템에서 고려하는 변수는 <그림 1>과 같다.



〈그림 1〉 모형 구축을 위한 도시고속도로축의 기하구조와 그 변수들

- 가로망 기하구조와 물리적인 자료
 - L_i^L : 고속도로구간 i 의 왼쪽부분의 길이
 - l_i^L : 고속도로구간 i 의 왼쪽부분의 차로수
 - L_i^R : 고속도로구간 i 의 오른쪽부분의 길이
 - l_i^R : 고속도로구간 i 의 오른쪽부분의 차로수
 - l_{ioff} : 고속도로구간 i 의 진출램프 차로수
 - l_{id} : 지선도로의 차로수
 - l_{is} : 인접도로의 차로수
 - u_i^L, v_i^L : 고속도로구간 i 의 교통량-밀도함수의 왼쪽부분의 교통량-밀도 관계에 대한 매개변수
 - u_i^R, v_i^R : 고속도로구간 i 의 교통량-밀도함수의 오른쪽부분의 교통량-밀도 관계에 대한 매개변수
 - ρ^{cr} : 고속도로 교통량이 최고에 달할 때의 임계 밀도
 - ρ^{max} : 고속도로의 jam density
 - R_i^{max} : 진입램프 i 의 최대 미터링 교통류율
 - R_i^{min} : 진입램프 i 의 최소 미터링 교통류율
 - b_i^{on} : 진입램프 i 에서 허용되는 최대 대기차량 수
 - b_i^{off} : 진출램프 i 에서 허용되는 최대 대기차량 수
 - b_i^L : 인접도로 구간 i 의 왼쪽에서 허용되는 최대 대기차량 수
- 동적 교통 수요
 - $q_0^R(k)$: 시간간격 k 동안 고속도로 구간 상류 끝에서 유입되는 교통류율
 - $A_0(k)$: 시간간격 k 동안 인접도로 구간 상류 끝에서 유입되는 교통류율
 - $S_i(k)$: 시간간격 k 동안 지선도로 상류끝에서 유입되는 교통류율
 - $e_i(k)$: 시간간격 k 동안 진출램프 i 를 통하여 고속도로에서 진출하는 비율
 - $\lambda_i(k)$: $S_i(k)$ 중 직진 비율
- 유고 자료
 - $\sigma_i^L(k)$: 고속도로 구간 i 의 왼쪽부분에서 유고로 인한 용량감소인자, $[1 - \sigma_i^L(k)]$ 는 용량의 감

소비율. 유고가 없으면 $\sigma_i^L(k) = 1.0$

$\sigma_i^R(k)$: 고속도로 구간 i 의 오른쪽부분에서 유고로 인한 용량감소인자, $[1 - \sigma_i^R(k)]$ 는 용량의 감소비율. 유고가 없으면 $\sigma_i^R(k) = 1.0$

• 교통량(평균교통류율, vph)

$q_i^L(k)$: 시간간격 k 동안 고속도로 구간 i 의 왼쪽에서 오른쪽으로 이동하는 교통류율

$q_i^R(k)$: 시간간격 k 동안 고속도로 구간 i 에서 $i+1$ 로 이동하는 교통류율

$Q_i^L(k)$: 시간간격 k 동안 고속도로 구간 i 의 왼쪽부분 교통류율

$Q_i^R(k)$: 시간간격 k 동안 고속도로 구간 i 의 오른쪽부분 교통류율

$A_i(k)$: 시간간격 k 동안 인접도로구간 i 의 상류로부터 유입되는 교통류율

$B_i(k)$: 시간간격 k 동안 인접도로 상류에서 진출램프 교차로로 접근하는 교통류율

$C_i(k)$: 시간간격 k 동안 인접도로구간 i 에서 진출램프 교차로에서 배출되는 교통류율

$E_i(k)$: 시간간격 k 동안 진출램프에서 나와 인접도로로 합류하는 교통류율

$F_i(k)$: 시간간격 k 동안 인접도로구간 i 에서 지선도로 교차로에서 배출되는 교통류율

• 시스템 매개변수

$\gamma_i(k)$: 시간간격 k 동안 인접도로 교통량 중 진입램프로 진입하는 비율

$o_i(k)$: 시간간격 k 동안 진입램프에서 고속도로로 진입하는 실제 교통류율의 비율

$d_i(k)$: 시간간격 k 동안 진출램프에서 계산되어 전환되는 실제 전환 교통류율의 비율

$\alpha_i(k)$: 인접도로 구간 i 의 차량군 분산 매개변수

$\eta_i(k)$: 인접도로 i 에서 $i+1$ 로의 직진교통량의 비율

• 풀어야 하는 제어변수

$R_i(k)$: 시간간격 k 동안 진입램프에 대한 미터링 교통류율

$D_i(k)$: 시간간격 k 동안 진출램프에서 전환되는 교통류율(일반 회전교통은 포함되지 않음)

$\delta_i(k)$: 시간간격 k 동안 인접도로에서 진출램프 교차로에서의 g/c 비율

$\beta_i(k)$: 시간간격 k 동안 인접도로에서 지선도로 교차로에서의 g/c 비율

• 상태변수

$\rho_i^L(k)$: 시간간격 k 동안 고속도로 구간 i 의 왼쪽부분의 평균 밀도

$\rho_i^R(k)$: 시간간격 k 동안 고속도로 구간 i 의 오른쪽부분의 평균 밀도

$x_i^{on}(k)$: 시간간격 k 동안 진입램프에서의 평균 대기행렬 차량수

$x_i^{off}(k)$: 시간간격 k 동안 진출램프에서의 평균 대기행렬 차량수

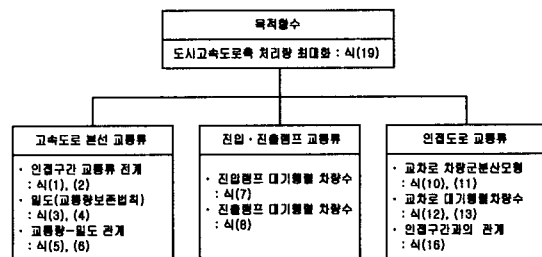
$x_i^L(k)$: 시간간격 k 동안 인접도로 구간 i 에서 왼쪽부분에서의 평균 대기행렬 차량수

$x_i^R(k)$: 시간간격 k 동안 인접도로 구간 i 에서 오른쪽부분에서의 평균 대기행렬 차량수

2. 동적통합제어모형 구축

동적통합제어모형은 고속도로본선교통류, 진입·진출램프교통류, 인접도로교통류의 교통류 상황을 동적 전개시키게 되며, 그 목적함수와 모형의 구축에 대해서는 <그림 2>와 같은 과정을 거치게 된다.

본 모형에서 추구하는 바는 교통감시자료와 유고 등의 정보에 근거해 최적 실시간 제어 전략(진입램프 미터링율 $R_i(k)$, 진출램프 전환율 $D_i(k)$, 인접도로 신호시간($\delta_i(k)$, $\beta_i(k)$)을 얻는 것이다.



<그림 2> 동적통합제어모형 구축 흐름도

1) 고속도로 교통류

인접구간 교통류의 동적 상호 관계를 나타내기 위해, 그 사이의 변환 교통류는 인접구간 두 경계 교통류의 평균을 취한다.

$$q^L_i(k) = \frac{1}{2} [Q^L_i(k) - e_i(k) Q^L_i(k) - d_i(k) D_i(k) + Q^R_i(k)] \quad 1 \leq i \leq N \quad (1)$$

$$q^R_i(k) = \frac{1}{2} [Q^R_i(k) + Q^L_{i+1}(k) - o_{i+1}(k) R_{i+1}(k)] \quad 1 \leq i \leq N-1 \quad (2a)$$

모형 상에서 본선 하류의 경계값은 다음과 같이 표현된다.

$$q^R_N(k) = Q^R_N(k) \quad (2b)$$

고속도로 상에서 밀도는 평균구간 밀도로 생각할 수 있고, 이는 교통량보존법칙에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho^L_i(k) = \rho^L_i(k-1) + \frac{T}{L^L_i l^L_i} [q^R_{i-1}(k) + o_i(k) R_i(k) - d_i(k) D_i(k) - e_i(k) Q^L_i(k) - q^L_i(k)] \quad 1 \leq i \leq N \quad (3)$$

$$\rho^R_i(k) = \rho^R_i(k-1) + \frac{T}{L^R_i l^R_i} [q^L_i(k) - q^R_i(k)] \quad 1 \leq i \leq N \quad (4)$$

Cassidy 등 (1997), Hall 등 (1986), Newell (1993) 등의 연구에서는 교통량과 밀도를 2구간 선형 함수로 나타낼 수 있다고 하였다. 따라서 각 구간에 대한 교통류-밀도 함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q^L_i(k) = [v^L_i(\rho) + u^L_i(\rho) \cdot \rho^L_i(k)] \sigma^L_i(k) \quad 1 \leq i \leq N \quad (5)$$

$$Q^R_i(k) = [v^R_i(\rho) + u^R_i(\rho) \cdot \rho^R_i(k)] \sigma^R_i(k) \quad 1 \leq i \leq N \quad (6)$$

2) 램프 교통류

진입·진출 램프에서는 대기행렬 차량수에 근거해 제어를 하게 되며, 이때 대기행렬 차량수는 다음과 같이 표현할 수 있으며, 모형은 진출램프에서 신호의 영향을 고려할 수 있어야 한다.

• 진입램프

$$x^{on}_i(k) = x^{on}_i(k-1) + [\gamma_i(k) A_i(k) - o_i(k) R_i(k)] T \quad 1 \leq i \leq N \quad (7)$$

• 진출램프

$$x^{off}_i(k) = x^{off}_i(k-1) + [d_i(k) D_i(k) + e_i(k) Q^L_i(k) - E_i(k)] T \quad 1 \leq i \leq N \quad (8)$$

진출램프에서 교차로로 방출되는 교통량은 대기행렬이 얼마나 있느냐에 관계되며, 이 경우 배출교통량은 다음과 같이 제약을 받게 된다.

$$0 \leq E_i(k) \leq \frac{x^{off}_i(k-1) + [d_i(k) D_i(k) + e_i(k) Q^L_i(k)] T}{T} \quad 1 \leq i \leq N \quad (9)$$

3) 인접도로 교통류

인접도로와 지선도로는 일방향이며, 모든 교차로는 2현시로 운영되는 것으로 가정한다.

진출램프 교차로의 경우, 신호가 없는 경우도 있으나, 여기서는 신호가 있는 경우까지 고려하도록 신호 교차로를 기준으로 모형을 구축한다. 지선도로의 경우 양방향으로 생각하고 모형을 구축하여야 할 것이나, 본 연구에서는 이를 일방향으로 가정한다.

인접도로는 교차로의 영향을 받으며, 구간 i 에서 상류와 하류 교통류 관계는 차량군 분산모형에 따라 다음과 같이 성립된다. 여기서, $t_i(k)$ 는 $0.8t_i(k)/T$ 에 가장 가까운 정수이고, $t_i(k)$ 는 시간간격 k 에서 대기행렬과 만날 때 그 구간을 가로지르는데 걸리는 평균 여행시간이다.

$$B_i(k) = [1 - \alpha_i(k)]A_i'(k) + \alpha_i(k)B_i(k-1) \quad 1 \leq i \leq N \quad (10)$$

$$A_i'(k) = \{1 - \gamma_i[k - t_i'(k)]\}A_i[k - t_i'(k)] \quad 1 \leq i \leq N \quad (11)$$

진입·진출램프와 마찬가지로, 인접도로 대기행렬 차량수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_i^L(k) = x_i^L(k-1) + [B_i(k) - C_i(k)]T \quad 1 \leq i \leq N \quad (12)$$

$$x_i^R(k) = x_i^R(k-1) + [C_i(k) + E_i(k) - F_i(k)]T \quad 1 \leq i \leq N \quad (13)$$

진출램프와 마찬가지로 교차로 배출교통량은 대기행렬차량이 얼마나 있느냐에 관계되며, 다음과 같이 제약을 받게 된다.

$$0 \leq C_i(k) \leq \frac{x_i^L(k-1) + B_i(k)T}{T} \quad 1 \leq i \leq N \quad (14)$$

$$0 \leq F_i(k) \leq \frac{x_i^R(k-1) + [C_i(k) + E_i(k)]T}{T} \quad 1 \leq i \leq N \quad (15)$$

인접도로, 지선도로에서 인접 구간과의 교통량 관계는 다음과 같다.

$$A_{i+1}(k) = S_i(k)[1 - \lambda_i(k)] + \eta_i(k)F_i(k) \quad 1 \leq i \leq N \quad (16)$$

위 식에 근거해 인접도로가 진출램프와 만나는 교차로와 인접도로와 지선도로가 만나는 교차로에서의 g/C 비는 다음과 같이 구해진다.

$$\delta_i(k) = \frac{C_i(k)/l_{is}}{C_i(k)/l_{is} + E_i(k)/l_{ioff}} \quad 1 \leq i \leq N \quad (17)$$

$$\beta_i(k) = \frac{\eta_i(k)F_i(k)/l_{is}}{\eta_i(k)F_i(k)/l_{is} + \lambda_i(k)S_i(k)/l_{id}} \quad 1 \leq i \leq N \quad (18)$$

여기서, $\delta_i(k)$ 와 $\beta_i(k)$ 는 비선형 식이기 때문에 본 선형 모형의 해찾기 과정에는 입력되지 않는다. 그러나, 모형에서 $C_i(k)$, $E_i(k)$, $F_i(k)$, $S_i(k)$ 가 결정되면, 이 값은 자동적으로 산출된다.

4) 목적함수 및 제약조건

제어 목적함수로는 여러 가지 것(여행시간, 속도, 처리량, 지체, 연료소비, 오염원배출 등)이 선택될 수 있겠지만, 유고 이후에 가장 우선시 되는 총처리량(total throughput)을 최대화하는 것을 MOE로 선택한다.

$$\text{Max} \sum_{i=1}^N [q_i^R(k) + A_{N+1}(k)]T \quad (19)$$

제약 조건은 식(1)~(16)에서 나온 것과 다음의 경계조건으로 구성된다.

식(20)은 진입램프에서의 미터링 교통류율, (21)은 전환교통류율, (22)~(25)는 대기행렬 차량수, (26)~(27)은 교차로 배출교통량에 대한 제약을 나타낸다.

$$R_i^{\min} \leq R_i(k) \leq R_i^{\max} \quad 1 \leq i \leq N \quad (20)$$

$$0 \leq D_i(k) \leq C_i^{\text{off}} - e_i(k)Q_i^L(k) \quad 1 \leq i \leq N \quad (21)$$

$$0 \leq x_i^{\text{on}}(k) \leq b_i^{\text{on}} \quad 1 \leq i \leq N \quad (22)$$

$$0 \leq x_i^{\text{off}}(k) \leq b_i^{\text{off}} \quad 1 \leq i \leq N \quad (23)$$

$$0 \leq x_i^L(k) \leq b_i^L \quad 1 \leq i \leq N \quad (24)$$

$$0 \leq x_i^R(k) \leq b_i^R \quad 1 \leq i \leq N \quad (25)$$

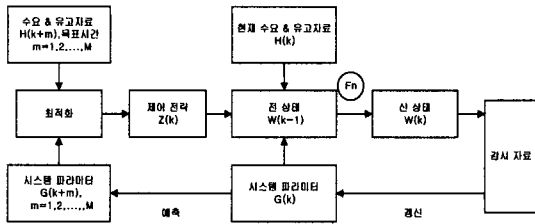
$$\frac{E_i(k)}{l_{ioff}} + \frac{C_i(k)}{l_{is}} \leq C_i^L \quad 1 \leq i \leq N \quad (26)$$

$$\frac{S_i(k)}{l_{id}} + \frac{F_i(k)}{l_{is}} \leq C_i^R \quad 1 \leq i \leq N \quad (27)$$

3. 실시간 제어를 위한 틀

1) 실시간 제어를 위한 흐름도

(그림 3)은 본 연구에서 도시고속도로축의 실시간



〈그림 3〉 실시간 도시고속도로속 제어 흐름도

제어를 위한 모형의 흐름도를 나타낸다. 그림에서 F_n 은 본 모형에서의 동적교통류전개모형을 나타낸다.

2) 동적통합제어 알고리즘

도시고속도로속의 동적통합제어를 위한 알고리즘은 다음과 같다.

1단계 : 자료 입력 및 갱신

- 가로망의 기하구조와 물리적인 자료 입력
- 시스템 매개변수 입력
- 동적 교통수요 입력
- 유고 자료 입력

2단계 : LP문제를 위한 적정 구간 선택

- 이전 교통류 상태에 근거해, 식(5), (6)을 사용할 알맞은 선행구간을 선택한다.

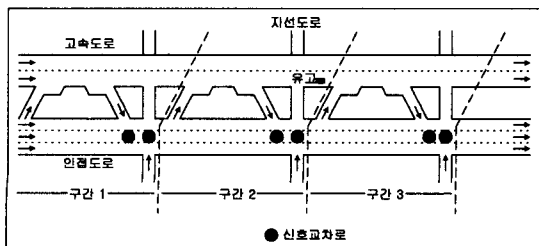
3단계 : LP 문제 풀이

- 주어진 모형식에 근거해 LP 문제를 풀어 제어치를 구한다.

IV. 모형의 검증

1. 시나리오 구성

본 연구에서는 〈그림 4〉와 같이 고속도로 본선, 진입램프와 진출램프, 인접도로, 지선도로로 구성되는 3개의 구간을 가진 도시고속도로속을 고려한다.



〈그림 4〉 도시고속도로속 가로망 예제

- 각 시나리오에서 적용되는 기본적인 가정은 다음과 같다.
- 전체구간의 길이는 6.6km이며, 각 구간의 형태는 동일하다.
 - 고속도로는 2차로이며, 인접도로는 3차로이다.
 - 각 시간간격은 3분으로 하며, 총 15 시간간격(45분)으로 구성된다.
 - 유고는 2번째 구간의 끝부분에서 발생한다.
 - 인접도로 상류의 제어경계에서 유입용량은 1200 대/시로 유지된다.
 - 지선도로 상류의 제어경계에서 유입용량은 600 대/시로 유지되고, 이중 30%가 인접도로로 우회전한다.
 - 모든 전환된 교통량은 하류의 가장 가까운 진입램프를 통해 진입램프의 용량이 허락하는 한 고속도로로 재진입한다.
 - 인접도로에서의 주기는 90초로 일정하다.

모형의 효과성을 평가하기 위해 〈표 1〉과 같은 5가지 시나리오를 구성하였다.

〈표 1〉 시나리오 구성

구 분	고속도로 수요	유고상황 (용량감소)	유고지속시간
시나리오 1	3300	0%	-
시나리오 2	3300	50%	9분(시간간격 5~7)
시나리오 3	3300	50%	15분(시간간격 5~9)
시나리오 4	3800	50%	9분(시간간격 5~7)
시나리오 5	3800	50%	15분(시간간격 5~9)

2. 모형의 해찾기

본 연구에서 제시한 동적교통류모형은 선형이며, 이를 수학적으로 해결하는데는 심플렉스 알고리즘을 이용하면 모형의 해를 구할 수 있다. 본 연구에서는 MPL(버전4.0)이라는 프로그램을 이용하였다.

3. 시뮬레이션 모형 선택

제안된 동적통합제어모형의 평가를 위해서는 도시고속도로속을 모사할 수 있는 시뮬레이션 모형이 필요하다. 본 연구에서는 교통 시뮬레이션 모형 TSIS (ver4.01)를 사용하였다. 이 모형은 미국 FHWA의 지원에 개발된 미시 교통류 시뮬레이션 모형으로, 기존의 고속도

로 시뮬레이션 모형인 FRESIM과 도시부 가로 시뮬레이션 모형 NETSIM을 통합한 시뮬레이션 모형이며, 이를 CORSIM이라 부른다. TSIS는 CORSIM과 결과물을 화면상에 보여주는 TRAFVU로 구성되는 시뮬레이션 패키지이다. 이 모형은 고속도로 뿐만 아니라 인접도로 상황을 잘 모사하는 것으로 알려져 있다.

TSIS에서는 다양한 MOE를 제공하는데 이중 처리량, 평균속도, 누적지체 등의 MOE에 기반해 제안된 모형의 효과성을 평가하도록 한다.

4. 시뮬레이션 결과 분석

각 시나리오에서 제어를 하지 않은 경우 인접도로에서 진입램프로 진입하는 교통량은 인접도로 교통량의 10%이며, 고속도로 본선에서 진출램프로 진출하는 교통량은 본선교통량의 10%로 일정하다. 또한 각 교차로에서 현시별 유효녹색시간은 41초, 손실시간은 3초, 적색시간은 1초로 가정한다.

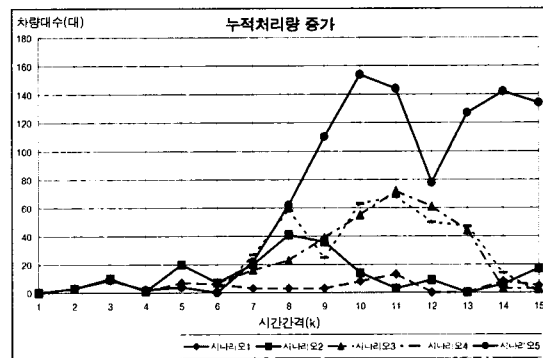
각 시간간격에서 제안된 동적통합제어모형을 통하여 진입램프에서의 램프미터링을, 진출램프에서의 전환을, 각 교차로에서의 현시를 구하게 되고, 이러한 제어전략을 시뮬레이션을 통하여 모사하게 된다.

〈표 2〉 모형실행으로 얻어진 해(시나리오5의 경우)¹⁾

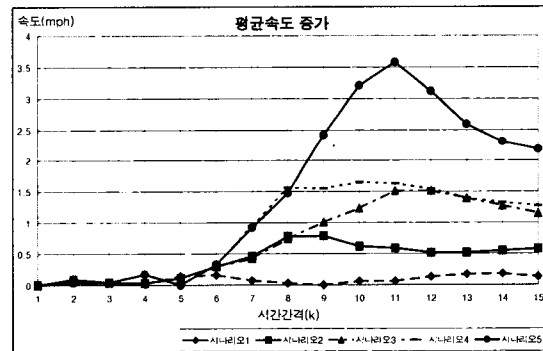
시간 간격	진입램프 회전비(%)			진출램프 회전비(%)			교차로별 유효녹색시간 (현시 : 왼쪽→오른쪽) 황색시간 3초, 적색시간 1초					
	진입 1	진입 2	진입 3	진출 1	진출 2	진출 3	교차 로1	교차 로2	교차 로3	교차 로4	교차 로5	교차 로6
1	10	10	10	10	10	10	41	41	41	41	41	41
2	10	10	10	10	10	10	41	38	43	38	37	33
3	12	12	13	10	10	10	38	36	42	37	44	37
4	12	10	10	10	11	10	42	39	41	38	47	39
5	13	10	40	10	38	10	40	36	18	49	43	38
6	12	10	43	10	40	10	40	36	14	47	43	37
7	17	11	43	22	18	10	26	42	43	43	36	32
8	12	10	41	22	22	10	26	41	40	60	36	32
9	13	10	47	22	15	52	24	40	44	40	39	33
10	12	10	11	12	10	10	35	36	46	39	45	37
11	12	10	10	11	10	10	38	38	47	40	42	34
12	10	12	10	10	10	12	42	39	45	39	40	38
13	13	10	10	10	11	12	42	39	42	38	42	40
14	12	10	10	11	11	10	38	38	38	35	50	41
15	10	10	10	11	10	10	37	36	41	36	43	41

일례로 시나리오 5의 경우 동적통합제어모형을 통해 구한 제어치를 시뮬레이션 입력형태로 전환한 제어전략은 〈표 2〉와 같다.

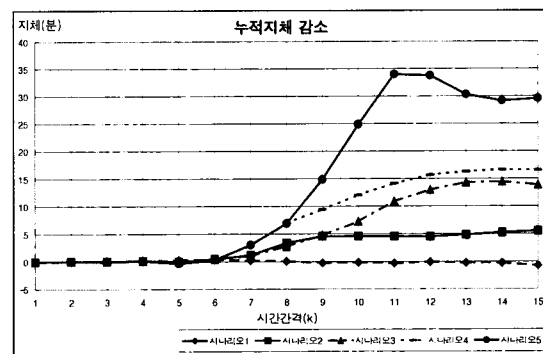
모형실행결과 얻어진 제어전략에 근거해 시뮬레이션을 해본 결과는 〈그림 5〉, 〈그림 6〉, 〈그림 7〉, 〈표 3〉과 같다.



〈그림 5〉 시나리오별 누적처리량 증가



〈그림 6〉 시나리오별 평균속도 증가



〈그림 7〉 시나리오별 누적지체 감소

1) 교차로에서 현시는 왼쪽→오른쪽, 남쪽→북쪽의 2현시로 구성

〈표 3〉 시나리오별 결과

시나리오 (유고시간간격)	구 분	최대 증가량 (시간간격)	최대 증가율 (시간간격)
시나리오 1 (유고 없음)	누적처리량 증가	13대(11)	1.08% (3)
	평균속도 증가	0.18mph(14)	0.45%(14)
	누적지체 감소	0.41분(6)	1.59% (6)
시나리오 2 (시간간격 5~7)	누적처리량 증가	41대(8)	1.73% (8)
	평균속도 증가	0.79mph(9)	2.18% (9)
	누적지체 감소	5.57분(15)	7.67% (9)
시나리오 3 (시간간격 5~9)	누적처리량 증가	72대(11)	2.20%(11)
	평균속도 증가	1.51mph(11)	4.66%(11)
	누적지체 감소	14.47분(14)	12.08%(13)
시나리오 4 (시간간격 5~7)	누적처리량 증가	68대(11)	2.35% (8)
	평균속도 증가	1.65mph(10)	4.89%(10)
	누적지체 감소	16.63분(14)	13.75%(12)
시나리오 5 (시간간격 5~9)	누적처리량 증가	154대(10)	5.22%(10)
	평균속도 증가	3.58mph(11)	12.76%(11)
	누적지체 감소	34.00분(11)	21.82%(11)

표와 그림에서 보는 바와 같이 본 모형의 적용을 통해 목적함수 값인 누적처리량이 증가함으로 모형은 실효성이 있으며, 평균속도의 증가와 누적지체의 감소를 통해 본 모형이 도시고속도로축의 제어에 유효한 것으로 검증되었다.

각 시나리오의 결과로부터 고속도로 본선의 수요가 증가함에 따라, 유고의 지속시간이 길어짐에 따라 누적처리량의 증가는 더욱 크게 나타났으며, 최대 5.22% (시나리오 5)까지 증가하였다.

평균속도는 최대 12.76% 증가하였으며, 누적지체는 최대 21.82% 감소하였다.

평균속도의 증가와 누적지체의 감소는 유고가 종료되고 지체가 풀리는 시간간격에서 크게 나타났다. 이는 본 모형의 적용을 통해 유고 상황이 모형을 적용하지 않은 경우 보다 훨씬 빨리 해소된다는 것을 의미하며, 그에 따라 지체 역시 감소한다는 것을 보여주는 것이다.

다시 말하면 모형에서 인접도로로 경로 전환을 시키고, 진입램프미터링과 신호시간 조정의 통합 제어를 통해 유고가 지속되는 상황에서도 모형을 적용하지 않은 경우보다 시스템에서 차량의 흐름이 보다 원활히 이루어지는 것을 나타낸다. 또한 그 효과는 유고가 종료된 이후 더욱 가속되는 것으로 나타났다.

V. 결론 및 향후연구과제

본 연구에서는 고속도로와 인접도로, 지선도로로 구성되는 도시고속도로축에 대한 동적통합제어모형을

구축하였다. 본 모형을 통하여 최적 램프미터링과 최적전환율, 최적신호시간을 도출하였다.

고속도로와 진입램프, 진출램프, 인접도로, 지선도로의 교통류 특성을 고려할 수 있도록 모형을 구성하였으며, 모형의 해찾기를 도모하기 위해 모형은 기본적으로 선형문제로 구성하였다. 특히 고속도로에서 유고가 발생하였을 경우 고속도로 수요의 진출램프로의 경로전환을 통하여 전체 시스템의 총 처리량을 최대화할 수 있도록 모형을 구축하였다. 본 연구는 사례연구를 통해 경로안내시스템의 효과를 예측할 수 있는 기반을 마련하였는데 그 의의가 있다.

본 모형의 특징으로는 다음을 들 수 있다.

- ① 고속도로와 진입램프, 진출램프, 인접도로를 하나의 시스템으로 고려하는 도시고속도로축에 대한 통합시스템 최적화모형이다.
- ② 감지된 교통류 특성과 수요에 기반해 연속적인 제어를 실행하는 동적제어모형이다.
- ③ 고속도로 상의 사고나 극심한 혼잡으로 인한 정체를 줄이기 위해 진출램프로의 경로전환을 유도하는 동적전환모형이다.

시뮬레이션을 통한 본 모형의 결과로는 다음을 들 수 있다.

- ① 유고가 존재하던 존재하지 않던 전체 시스템의 처리량은 항상 제어하지 않은 경우보다 컸다.
- ② 본 모형의 적용을 통하여 유고시 평균속도의 증가를 보였다.
- ③ 본 모형의 적용을 통하여 유고시 누적지체의 감소를 보였다.
- ④ 본 모형의 적용을 통하여 보다 빠른 시간 내에 유고 상황을 처리한다.
- ⑤ 유고의 지속시간이 길수록 유고의 크기가 클수록 모형을 통한 시스템 개선효과는 더욱 크다.

본 모형에 대한 향후연구과제로는 다음과 같은 것을 들 수 있다.

- ① 본 모형의 실시간 적용을 위해서는 본 모형에서 가정한 실시간 수요자료를 예측할 수 있어야 한다. 본 모형에서는 이를 일정한 것으로 가정하였

으나, 실시간 적용을 위해서는 수요예측에 관한 연구가 필요하다. 또한, 유고감지알고리즘의 적용도 필요하다.

- ② 본 모형은 기종점 자료에 기반한 것이 아니기에 효과적인 경로전환이라고 고려할 수 없다. 기종점 자료에 기반한 최적경로전환모형의 개발이 필요하다.
- ③ 본 모형에서는 인접도로와 지선도로를 일방향으로 가정하였는데, 양방향일 경우에 대한 모형의 개선이 필요하다.
- ④ 본 모형은 지체를 효과적으로 고려하고 있지 못하다. 시나리오 1의 후반부에 누적지체의 증가가 목격되었다. 모형에 지체를 고려할 수 있는 변수를 추가할 필요가 있다.

참고문헌

1. 건설부(1992), 도로용량편람.
2. 강경표(1998), "도시고속도로 교통축에 대한 통합 제어모형 및 알고리즘 개발", 서울대학교 대학원, 석사학위 논문.
3. 김동선(1997. 12), "도로지능화를 위한 교통축제어모형개발에 관한 연구", 한국지형공간정보학회 논문집, 제5권 제2호, pp.29~43.
4. Axhausen, KW and Korling, Hans-Georg(1987), "Some Measurements of Robertson's Platoon Dispersion Factor", Transportation Research Record 1112, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.71~77.
5. Banks, James H.(1989), "Freeway Speed-Flow-Concentration Relationships: More Evidence and Interpretations", Transportation Research Record 1225, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.53~60.
6. Cassidy, M. J. and Coifman, B.(1997), "Relation among average speed, flow, and density and analogous relation between density and occupancy", Transportation Research Record 1591, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.1~6.
7. Chang, G.-L., Ho, P.-K. Wei, C.-H.(1993), "A Dynamic System-optimum Control Model for Commuting Traffic Corridors", Transportation Research C, Vol 1C, pp.3~22.
8. Chang, G.-L., Wu, J., and Lieu, H.(1994), "Real-Time Incident-Responsive System Corridor Control: Modeling Framework and Preliminary Results", Transportation Research Record 1452, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.42~51.
9. Diakaki, Christina and Papageorgiou, Markos (1997), "Simulation Studies of Integrated Corridor Control in Glasgow", Transportation Research C, Vol. 5, No. 3/4, pp.211~224.
10. FHWA/KAMAN(1997), Traffic Software Integrated System 97, User's Guide, Federal Highway Administration, McLean, Virginia.
11. Gartner, N., H., Messer, C.,J., Rathi, A.,K. (1997), Traffic Flow Theory A Monograph, Revised Edition, Transportation Research Board, National Research Council, Washington.
12. Gartner, N. H.(1983), OPAC: "A Demand-Responsive Strategy for Traffic Signal Control", Transportation Research Record 906, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.75~81.
13. Goldstein, N. B and Kumar, K. S. P.(1982), "A Decentralized Control Strategy for Freeway Regulation", Transportation Research-B Vol. 16B, No. 4, pp.279~290.
14. Grewal, Mohinder S., and Payne, Harold J.(1976), "Identification of Parameters in a Freeway Traffic Model", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, VOL. SMC-6, NO. 3, pp.176~186
15. Hall, Fred L., Allen, Brian L., Gunter, Margot A(1986), "Empirical Analysis of Freeway Flow-Density Relationships", Transportation Research A, Vol. 20A, pp.197~210.
16. Jian Leo, Chin and Pretty, Robert L.(1992), "Numerical Simulation of Macroscopic Continuum Traffic Models", Transportation Research B, Vol. 26B, No. 3, pp. 207~220.
17. Lu, Jian(1990), "Prediction of traffic flow by an adaptive prediction system", Transportation Research C, Vol 1C, pp.3~22.

- portation Research Record 1287, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.54~61.
18. Newell, G. F.(1993), "A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, Part I: General theory; Part II: Queuing at freeway bottlenecks; Part III: Multi-destination flows", *Transportation Research B* 27, pp.281~314.
 19. 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.
 20. Papageorgiou, M., Blosseville, Jean-Marc and Haj-Salem, Habib(1990), "Modelling 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, No. 5, pp.361~370.
 21. Papageorgiou, M.(1990), "Dynamic Modeling, Assignment, and Route Guidance in Traffic Networks", *Transportation Research B*, Vol. 24B, No. 6, pp.471~495.
 22. Papageorgiou, M., et al.(1994), "Integrated Control of Traffic Corridors", In proceedings of the First World Congress on Applications of Transport Telematics and Intelligent Vehicle-Highway Systems, Vol. 2, Paris, pp.556~563.
 23. Papageorgiou, M.(1995), "An Integrated Control Approach For Traffic Corridors", *Transportation Research C*, Vol. 3, No. 1, pp.19~30.
 24. Reiss, R. A., Gartner, N. H. and Cohen, S. L.(1991), "Dynamic Control and Traffic Performance in a Freeway Corridor: A Simulation Study", *Transportation Research A*, Vol.25A, pp.267~276.
 25. Stephanedes, Y. J., E. Kwon and P. Michalopoulos(1989), "Demand Diversion for Vehicle Guidance, Simulation, and Control in Freeway Corridors", *Transportation research record 1220*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.12~20.
 26. Stephanedes, Y. J., E. Kwon and Michalopoulos, P.(1990), "On-Line Diversion Prediction for Dynamic Control and Vehicle Guidance in Freeway Corridors", *Transportation research record 1287*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.11~19.
 27. Stephanedes, Y. J. and E. Kwon(1993), "Adaptive Demand-Diversion Prediction for Integrated Control of Freeway Corridors", *Transportation Research C*, Vol. 1C, No. 1, pp.23~42.
 28. TRB(1994), Highway Capacity Manual special report 209, Third edition, *Transportation Research Board*, National Research Council, Washington.
 29. Van Aerde, M., et al.(1987), "A Review of Candidate Freeway-Arterial Corridor Traffic Models", *Transportation Research Record 1132*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.53~65.
 30. Van Aerde, M and Yagar, S.(1988), "Dynamic Integrated Freeway/Traffic Signal Networks: Problems and proposed solutions", *Transportation Research A*, Vol. 22A, pp.435~443.
 31. Van Aerde, M and Yagar, S.(1988) "Dynamic Integrated Freeway/Traffic Signal Networks: Route-Based Modelling Approach", *Transportation Research A*, Vol. 22A, pp.445~453.