

# 도시고속도로축 동적 교통관리모형 개발에 관한 연구

김 훈 (교통개발연구원)

## I 서론

도시고속도로 축은 접근을 제약하고 이동성을 강조하는 도시고속도로와 주변의 연계 신호간선도로들을 근간으로 하며, 경로선택을 위한 상기 도로들간의 대체가 보장되는 직접적인 영향권으로 정의할 수 있다. 도시고속도로 축은 진출입 램프 주변을 중심으로 한 과도한 수요와 연계 운영체계의 미비 등에 따른 혼잡발생의 가능성이 크며, 특히 유고발생 등과 같은 일상적 통행패턴에서 왜곡된 이벤트가 발생할 경우 해당 링크 자체의 통행시간 증가뿐만 아니라 연계된 여타 링크의 용량감소 등 도시고속도로 축 전체용량의 비효율적 활용을 야기한다.

도시고속도로 축을 대상으로 하는 동적 교통관리는 정보제공을 통한 수요의 효과적인 배분과 신호제어를 통한 용량의 효율적 활용을 통해 이루어진다. 고속도로의 경우 교통관리는 본선구간을 주행하는 차량에 대한 직접적인 제어보다는 정보제공을 통한 교통수요의 우회와 진입램프 미터링을 통한 고속도로 본선용량의 효율적 활용을 관리의 기본목표로 설정할 수 있다. 그리고 신호간선도로의 교통관리는 교통류의 상층과 주기적 단속이 발생하는 교차로에서의 신호설계를 통해 구현되는데, 연속류와 단속류 특성을 갖는 이들 두 시스템은 상호연관성을 갖게되나 시스템간 인터페이스 부재 하에 수행되는 개별 관리전략으로 인해 고속도로 진출입 램프를 중심으로 한 고속도로 본선 및 주변 도로의 교통혼잡 발생과 같은 교통관리의 한계성을 보이고 있어 이에 대한 대안으로 고속도로와 신호간선도로를 통합한 관리모형 개발의 필요성이 강조되고 있다.

본 연구에서는 이질적인 교통 및 제어특성을 보유한 도시고속도로축을 대상으로 하여 가변적 시공간에 대한 교통류 예측을 위한 동적 통행배정모형과 네트워크 통행여건 개선을 위한 동적 제어모형간의 결합을 통한 동적 교통관리모형의 구현과 이를 이용한 관리전략의 평가를 도모하였다.

본 연구의 관리모형은 기존의 완전정보 (또는 순간 완전정보)를 바탕으로 하는 시스템 차원의 경로안내를 위한 통행배정 모형과는 달리 경험정보, 특정 지점에서의 통행 중 정보 등을 반영한 불완전 정보체계하의 통행자의 현실적 동적 경로선택을 고려할 수 있는 meso-scopic 시뮬레이션 기반의 동적 통행배정 모형을 구현한다. 동적 제어모형의 경우 각 링크의 이질적인 제어특성을 고려하여 각기 독립적으로 최적화 하되, 동적 네트워크 통행량 부하과정을 통해 도시고속도로 축 전체의 성과지표 개선을 도모하며, 그리고 동적 통행배정 모형과 제어모형의 결합은 단위 제어주기 동안의 시스템 차원의 순간 최적화를 도모하는 결합구조를 갖도록 하였다.

한편, 본 연구에서는 동적 교통관리모형 내에 포함된 각 모듈(module)들을 대상으로 한 구체적인 정산과정 보다는, 모형의 적정성 평가와 교통특성에 따른 관리전략의 평가에 초점을 두었다.

## II. 기존연구 고찰

### 1. 도시고속도로축 제어

일반적으로 도시고속도로 교통축 통합제어는 교통축을 통행하는 교통류를 효과적으로 통제하기 위해 동적 교통량 예측모형, 전환교통량 예측모형, 시스템 최적제어모형, 시스템 관제 및 피드백 요소 등으로 구성되며, 이들 각각의 요소와 관련한 다양한 연구가 진행되고 있다.

동적 교통량 예측 모형의 경우 교통량의 표현이나 상태공간의 표현에 있어서 이산, 연속 여부 그리고 링크용량의 존재 여부 등에 따라 다양한 접근이 가능하나, 제어모형의 용이한 적용을 감안하여 Chang 등 (1994)의 연구에서처럼 선형화한 교통량-밀도 함수를 이용하여 평균 구간밀도로 정의하거나, 해석적 형태의 링크 통행함수를 이용하여 예측한다.

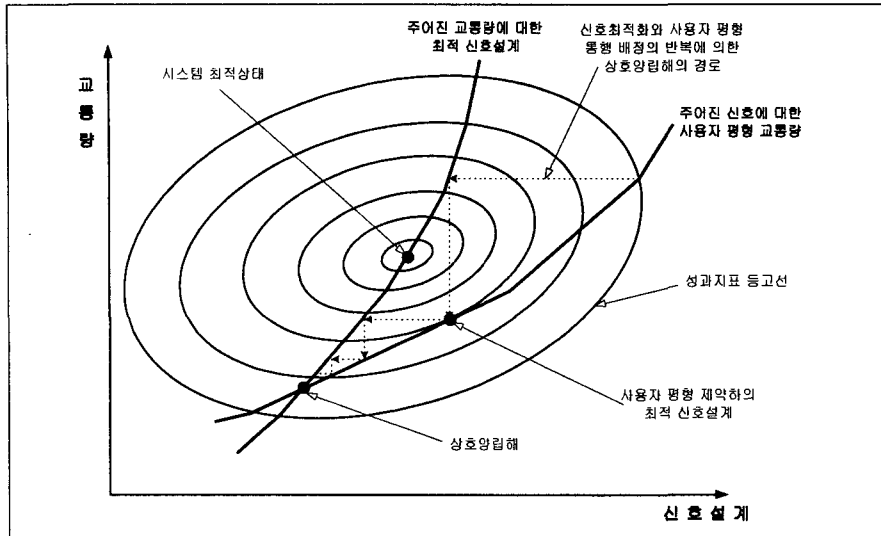
전환교통량의 예측은 Stephaneds 등(1993)과 같이 고속도로와 인접도로 교통류간의 시간종속적 상호관계를 묘사할 수 있는 별도의 수요전환 모형을 만들어 교통제어에 의한 수요의 시변적 효과를 취급하며, 해석기반의 동적통행배정 모형을 이용하는 경우에는 제어를 위한 링크함수의 현실묘사 부족이라는 한계를 갖는다.

시스템 최적 제어모형은 시스템 전체를 대상으로 하는 목적함수와 제약조건으로 구성하는데 도시고속도로축의 경우 링크 교통특성과 목적함수가 상이하므로, 각 링크의 교통상태를 단순 연속방정식으로 구축하여 총 처리량(total throughput) 최대화 또는 지체최소화 등을 전체 목적함수로 하는 선형계획법(LP) 문제를 푸는 것이 일반적이다. 그러나 링크 통행시간 또는 지체 산정식 등이 비선형임을 감안할 때 이들 구성요소에 대한 선형화 과정은 오차 발생의 가능성과 함께 제어변수와 상태변수를 동시에 고려하는 simultaneous method의 특성상 문제 규모가 커지는 단점을 갖는다.

### 2. 동적통행배정과 제어모형의 결합

제어 및 통행배정은 각각의 분야에서 하나의 고정 값을 전제로 최적화 하는 것이 일반적이거나 실제로는 사용자 통행비용의 경우 신호전략에 의해 달라질 수 있으며, 신호제어 변수 또한 사용자의 경로선택 경향에 따라 결정되므로 교통제어시스템의 설계 및 운영과 효율적인 교통류 관리를 위해서는 신호설계 변수와 교통류 패턴간의 결합이 필요하다.

제어와 통행배정의 결합 모형은 문제의 비볼록성(non-convexity)으로 인해 다수의 해가 존재할 수 있으며 아울러 평형 통행배정과 신호설계는 휴리스틱 특성을 포함하는 것으로 알려져 있다. 그리고 일반적으로 결합모형의 상호 양립해는 시스템 차원에서 볼 때 불량한 해의 도출가능성이 큰 것으로 알려져 있다.



<그림 1> 통행배정과 신호설계간의 상호 양립성

기존의 통행배정 및 제어의 결합모형은 정적모형을 기반으로 한 네트워크 신호설계 차원의 모형인데 반해 최근에는 실시간 통행배정 모형과 동적 제어의 결합을 통한 동적 교통관리 차원의 모형 개발이 이루어지고 있다. 동적 교통관리 모형에서 네트워크 성과지표의 개선을 위해 향후 네트워크 상태에 대한 예측과정이 필수적이며 이를 위해 동적 통행배정 모형이 요구된다. 예측된 동적 교통상태를 기반으로 하여 제어모형 내에서는 네트워크 제어전략의 수립 및 이의 최적화가 이루어지는데 이들 간의 결합은 정적 결합모형에서와 같은 반복적 과정 또는 통행자들의 반응을 고려한 전역 최적화 방법 등을 통해 이루어진다.

Chen(1998)은 제어주체와 사용자간의 각기 다른 게임이론을 적용하여 다양한 신호전략에 따른 동적 제어와 변동부등식을 이용한 경로기반의 해석적 동적 통행배정모형의 결합을 도모하였으나 간단한 링크함수로 구현되었음에도 불구하고 gradient 계산이 용이하지 않는 것으로 나타났다.

한편, 동적통행배정과 제어모형의 결합을 이용한 관리모형의 응용을 보면 Abdelghany 등(1998)은 동적 교통관리를 위해 실시간 동적 통행배정 모형을 통한 교통류의 예측과 이를 이용한 경로기반의 신호연동화를 수행하였는데 기존의 신호간선도로에서 도모하는 직진 링크 위주의 연동제어 보다는 회전을 포함한 경로제어를 통한 네트워크 개선을 도모하였다. Abdelfatah 등(1998)은 시스템 최적 동적 경로기반 통행배정과 신호설계의 결합을 도모하였으며, Gartner & Stamatiadis(1997)는 동적 통행배정 모형을 통해 예측된 교통상태를 기반으로 하여 실시간 교통량 적응제어 시스템과의 결합을 도모하였다.

최근의 관리모형 응용의 예에서 보듯이 동적통행배정과 제어모형의 결합은 기존 정적상황에서처럼 상호양립해의 추구보다는 시스템 최적화 차원에서 결합이 이루어지고 있음을 시사한다.

### III. 동적 교통관리모형 구축

#### 1. 관리모형 구조

도시고속도로축을 대상으로 하는 본 연구의 동적 교통관리모형은 동적 네트워크상의 링크 교통량 예측을 위한 동적 통행배정모형과 시스템 최적화를 도모하기 위한 제어모형으로 구성된다.

동적 통행배정모형 내에서 경로선택과 통행량 부하과정은 반복 수행하는 것이 보편적인데, 이는 다른 통행자의 경로선택을 고려한 사용자 평형 상태의 추구라는 의미를 갖는다. 그러나 본 연구의 모형에서는 정보취득의 제약을 고려한 현실적인 통행자 중심의 경로선택을 반영하기 위해 동적 통행배정모형 내에 정보 순환을 배제한다. 이는 불완전 정보체계 하에서 정보제공 전략을 통한 통행자 경로선택의 변경과 이를 통한 네트워크 성과지표 개선효과의 평가에 초점을 두기 위한 것으로서, 경로비용에 대한 통행자의 경험정보와 취득 가능한 통행중 제공 정보를 기반으로 하는 사용자의 현실적 경로선택 구현을 통해 통행여건 변화에 따른 통행자들의 시스템 적응 과정 묘사 및 정보제공의 효율적 평가를 도모할 수 있다.

한편, 본 연구의 동적 교통관리모형에서는 통행배정과 제어모형간의 결합에 있어서 상호 양립 가능한 해의 탐색을 도모하는 계획차원의 접근보다는 실시간 운영차원의 시스템 최적화에 중점을 둔다. 기존의 관리모형이 갖는 수요와 공급의 평형상태 추구는 순간적인 조정과정 등에 대한 묘사보다는 최종결과로서의 평형상태에 대한 평가에 초점을 두므로 첨두시 동적 통행수요를 대상으로 한 통행중 정보제공, 적응제어 등과 같은 관리차원의 섭동(perturbation)에 대한 반응 등을 효율적으로 묘사하지 못한다.

가변적인 도시고속도로축의 동적 교통특성에 대한 고려와 제어변수 갱신정보에 대한 통행자들의 순간정보 취득의 한계 등을 고려하여 본 연구에서는 동적 통행배정 모형을 이용하여 예측된 단위 제어주기 동안의 링크 평균 교통량을 이용한 시스템 순간 최적제어를 도모하며, 이 경우 주어진 제어주기 동안의 경로변경은 고려하지 않는다. 다만, 제어변수 변화에 따른 링크 통행함수의 변화로 인한 통행량의 상태전이를 고려하기 위해 링크함수의 변경 및 통행량 부하과정을 반복 시행하는 반복 제어 구조 형태를 취한다.

#### 2. 동적 네트워크 구축

##### 1) 노드

노드는 수요의 발생 및 도착이 이루어지는 기종점과 도로간의 교차점 등으로 이루어지는데 도로간의 교차점의 경우는 진출입램프, 교차로 등으로 구성되며, 노드에 교통제어기가 설치될 경우에는 교통제어기가 이루어져 유출링크에 대한 용량 공급의 변화를 기할 수 있으며, VMS 설치 노드에서는 교통정보의 습득을 통한 사용자의 경로선택과 같은 수요 차원의 변화를 도모한다.

## 2) 링크

본 연구에서 제어링크인 신호간선도로의 교차로와 교차로를 연계하는 링크에 대한 표현은 공통 유입부와 하류부 교차로의 일정한 물리적 거리(차선 노면 표지 구간 등)로 정의되는 방향별 접근로로 구성된 링크들로 나타낸다. 공통 유입부는 유입교통량과 무관하게 링크길기와 주변 마찰 요소들에 의해 통행시간이 결정되도록 링크함수를 정의하되 접근로상의 과도한 대기행렬 발생시 이를 추가로 고려하는 링크함수를 취한다. 따라서 이러한 교차로간 신호 링크의 표현은 비포화 상태일 경우 링크의 독립성을 전제로 하는 해석적 모형과 동일하게 되며 과포화시에는 대기행렬에 의한 링크간의 종속성을 묘사할 수 있다.

고속도로 본선과 같은 비 제어 링크의 경우 반복적인 대기행렬의 형성이 일반적이지 않으므로 유출입 구간의 분류를 하지 않는다.

## 3) 링크통행시간 함수

### (1) 신호간선도로 링크 통행시간 함수

본 연구에서는 앞서 정의한 교차로간 연계 링크 표현방식에 따라 신호링크의 통행시간을 주어진 분석시간에 대한 공통 유입부 통행시간과 각 방향별 유출부 지체시간의 합으로 표현한다.

$$T_a(k) = T_a^1(k) + T_a^2(k) \quad (1)$$

여기에서,

$T_a(k)$  : 링크 a의 총 통행시간 ,

$T_a^1(k)$  : 링크 a의 공통 유입부 통행시간

$T_a^2(k)$  : 링크 a의 접근로 지체시간

신호간선도로에서 유입부 통행시간  $T_a^1(k)$ 은 유입 교통량이 하류부 방향별 접근로에 도달하는데 까지 걸리는 시간이나 본 연구에서는 순행속도를 전제로 해당 링크 전체 길이에 대한 주행시간으로 정의하였다. 한편, 접근로 수용용량을 초과하는 대기행렬이 발생할 경우 유입부 통행시간 증가에 대한 고려가 요구된다. 일반적으로 접근로 진입 이전까지는 방향별 차선에 대한 구분이 없고 아울러 상대적으로 교통량이 적은 차선을 이용하는 운전자들의 행태를 감안할 때, 접근로 수용용량을 초과하여 발생한 대기행렬은 결과적으로 유입부 전체에 영향을 주게되며, 이들 접근로 수용용량을 초과하는 대기행렬은 공통유입부 대기행렬로 간주한다. 따라서 공통 유입부 통행시간은 순행속도를 전제로 한 링크 전체의 주행시간과 초과 대기행렬 처리시간의 합으로 정의하며, 대기행렬 처리시간은 초과 대기행렬 발생 접근로의 처리용량을 바탕으로 산정한다.

$$T_a^1(k) = \frac{l_a}{w_a^o(k)} + \Delta T_a^1 \quad (2)$$

$$\Delta T_a^1 = \frac{x_a^1 \cdot \Delta k}{\sum_{a \in \{a | Q_a^2 \leq x_a\}} S_a \cdot g_a}, \quad \forall a \in L_a^{in} \quad (3)$$

$$x_a^1(k) = \sum_{a \in L_a^{in}} \max [x_a(k) - Q_a^2(k), 0] \quad (4)$$

$$Q_a^2(k) = \frac{l_a^2 \cdot n_a^2}{l_v} \quad (5)$$

여기에서,

$l_a$  : 링크 a의 전체길이

$w_a^0(k)$  : 링크 순행속도

$x_a^1(k)$  : 신호링크 a의 공통유입부 대기차량

$x_a(k)$  : 링크 a의 대기차량

$Q_a^2(k)$  : 링크 a의 접근로 대기차량 수용용량

$L_a^{in}$  : 링크 a와 유입부를 공유하는 링크들의 집합

$S_a(k)$  : 링크 a의 접근로 포화교통류율

$g_a(k)$  : 링크 a의 접근로 녹색시간비

$l_a^2$  : 링크 a의 접근로 길이

$l_v$  : 정지차량 차간거리

$n_a^2$  : 링크 a의 접근로 차선 수

한편, 링크 a의 접근로 포화교통류율  $S_a(k)$ 은 분석 단위시간당 포화교통류율  $S_a(\Delta k)$ 을 기초로 하  
 되 통행량 부하를 위한 단위시간과 링크순행 통행시간 등을 고려하여 보정한다. 이는 본 모형의 동  
 적 통행량 부하과정에서 발생하는 대기차량이 경우에 따라서는 실제 대기차량이 아닌 경우가 생겨  
 나기 때문이다. 즉, 링크길이가 매우 길어 자유주행속도로 운행하더라도 링크순행 통행시간이 2개 이  
 상의 단위분석시간 보다 클 경우에 이들 차량들은 대기차량으로 간주된다.

$$S_a(k) = S_a(\Delta k) \cdot f(\Delta k, l_a, w_a^0) \quad (6)$$

링크 유출부 신호 지체시간  $T_a^2(k)$ 는 균일지체와 분석시간 동안의 분석시간 기준 대기행렬을 근  
 간으로 하는 과포화지체로 구성되며, 교통류의 비균일 도착분포와 일시적인 cycle failure에 의한 확  
 률적 랜덤지체는 본 연구와 같이 짧은 단위분석 시간을 갖는 모형의 경우 평균 대기행렬의 길이와  
 차량의 지체 산정과정 내에서 동적 변동 특성을 어느 정도 감안할 수 있으므로 확률적 랜덤지체는

배제할 수 있다.

$$d_a^u = \frac{0.5C^m [1 - g_a]^2}{1 - \text{Min}[1, \rho_a] \cdot g_a} \quad (7)$$

$$d_a^o(k) = \Delta k \cdot \frac{\text{Max}[x_a(k) - S_a \cdot g_a, 0]}{S_a \cdot g_a} \quad (8)$$

여기에서,

$d_a^u$  : 링크 a의 접근로에서 균일지체시간

$C^m$  : 교차로 m에서의 신호주기

$\rho_a$  : 링크 a의 접근로에서의 포화도

$d_a^o(k)$  : 링크 a의 접근로에서의 과포화 지체시간

### (2) 고속도로 본선 링크 통행시간 함수

고속도로 본선 교통류는 유고발생, 차선감소 지점 등에서의 용량감소에 의한 대기행렬 형성을 제외하고는 링크 상의 지체발생 지점을 표현하기 어려우므로 단속류와 같은 차량의 정지지체 발생은 매우 예외적인 교통현상이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 연속류의 경우 기존의 BPR 형식의 통행시간 함수를 이용한다.

$$T_a(k) = \frac{l_a}{w_a^o} \cdot \left\{ 1 + \alpha \left[ \frac{x_a(k)}{\text{Cap}_a(k)} \right]^\beta \right\} \quad (9)$$

$$\text{Cap}_a(k) = \text{Cap}_a(\Delta k) \cdot f(\Delta k, l_a, w_a^o) \quad (10)$$

여기에서,

$\text{Cap}_a(k)$  : 링크 a의 처리용량

$\alpha, \beta$  : BPR 함수관련 파라미터

통행시간은 대기차량이 주어진 링크 구간 전체에 대해 균일하게 분포한다는 가정을 전제로 하며, 교통량 변수는 현재시간 기준 대기차량을 사용하는데 이는 통행량 부하간격이 짧기 때문에 주어진 시간간격에 진입한 차량은 반드시 현재 기준의 대기차량이 되므로 유입교통량에 대한 고려가 이루어지며 아울러 이전시간 대기차량 중 주어진 시간간격 동안에 유출되는 차량은 링크 통행시간에 영향을 미치지 않는 현실적 특성을 반영하기 위함이다.

### (3) 고속도로 램프 통행시간 함수

진입램프 통행시간은 신호교차로에서 신호간선도로상의 진입램프 접속지점까지의 주행시간과 램프구간의 통행시간으로 구성된다. 신호간선도로 주행시간은 신호간선도로의 연계지점과 관련하여 산정되며 램프상의 통행시간은 램프 미터링 실시 유무에 따라 각기 달리 계산된다.

미터링 미 실시 진입램프구간의 경우는 고속도로 본선과의 접속부분에서 합류에 따른 용량감소 등이 일어나 주행속도에 영향을 줄 수 있으나 정지지체 발생 등은 보편적인 현상이 아니므로 고속도로 본선 구간에 준한 BPR유형의 통행시간 함수를 사용한다.

미터링 실시 진입램프의 경우는 교차로의 교차지점에서와 같은 대기행렬이 발생하게 되므로 단속류와 같은 접근이 필요하다. 램프 순행구간 주행시간은 램프설계속도를 기준으로 하여 램프구간 전체를 주행하는데 소요되는 시간으로 산정하며, 램프구간의 지체시간은 단위분석시간 동안의 대기차량 수와 서비스율을 이용하여 산정한다.

$$d_a(k) = \Delta k \cdot \frac{x_a(k)}{S_a \cdot g_a} \quad (11)$$

### 3. 동적 통행배정 모형

#### 1) 동적 통행배정 모형의 구조

본 연구에서 사용하는 동적 통행배정모형은 패킷 단위 시뮬레이션 기반의 통행배정모형을 이용하는 데, 본 모형은 동적 상황에서의 사용자 평형상태 추구보다는 정보체계 하에서 경로비용에 대한 통행자의 경험정보와 실시간 제공 정보를 기반으로 하는 사용자의 현실적 경로선택에 중점을 둔다. 패킷기반의 시뮬레이션 모형은 통행중 경로전환에 대한 행태 묘사나 앞막힘 현상 등 해석적 모형에 비해 네트워크 상태묘사가 상대적으로 현실적이며, 용량을 포함하는 링크함수를 사용하므로 미시적 시뮬레이션에 비해 상대적으로 시스템 최적화 과정이 용이한 장점을 갖는다.

시스템의 평형상태를 추구하는 해석기반의 통행배정 모형은 수요와 공급의 순간적인 조정과정 등은 묘사되지 않으므로 가변적인 일내(within day) 통행수요 또는 적응신호제어, 통행정보제공 등 공급차원의 섭동(perturbation)에 대한 반응 등이 효율적으로 묘사될 수 없다. 따라서 본 연구에서는 동적 상황에서의 사용자 평형상태 추구보다는 정보체계 하에서 경로비용에 대한 통행자의 경험정보와 실시간 제공 정보를 기반으로 하는 사용자의 현실적 경로선택에 중점을 둔다. 정보체계와 경로선택의 결합모형은 특정지점에서의 가변정보표지(Variable Message Sign; VMS)을 이용한 정보제공에 중점을 두어 출발지에서의 경로선택과 가변정보표지 설치 지점에서의 경로변경만이 가능하도록 모형화 한다. 경로선택시 통행자의 경험정보와 정보제공 시점의 경로통행 정보와의 상호작용 등을 포함하는 외연적 모형의 도입은 통행여건 변화에 대한 통행자들의 시스템 적응 과정을 묘사할 수 있어 동적 관리전략의 효율적 평가를 가능케 할 수 있다.

#### 2) 경로선택

본 연구에서는 모든 통행자를 정보 중립적 통행자로 간주하며 우선, Jayakrishnan 등(1994)이 제안



한 GP(Gradient Projection)를 이용한 경로기반의 일간 정적통행배정 모형을 활용해 k개의 가능경로 선택 및 경로별 효용을 계산한다. 그리고 이들 경로별 선택확률을 경험정보로 정의한다.

따라서 통행자는 불완전 정보체계로 인해 경로선택 노드에서 특정 기종점간의 경로에 대한 획득 가능한 현재 통행정보 기반의 효용과 경험기반 효용으로 구성된 결합효용에 의해 경로를 선택하도록 모형화 한다. 주어진 기종점에 대한 통행자들의 경험 경로집합과 제공된 정보기준의 경로집합이 일치할 경우 결합효용은 가장 단순한 형태로서 이들 두 효용에 대한 가중치를 적용하여 효용 함수를 만들 수 있다.

$$Ut_p(t) = \alpha_{ut} \cdot Ut_p^1(t) + (1 - \alpha_{ut}) \cdot Ut_p^2 \quad (12)$$

여기에서,

$Ut_p(t)$  : 시간 t일 때 경로 p에 대한 전체 효용

$Ut_p^1(t)$  : 경로 p에 대한 현재정보 기반 효용

$Ut_p^2$  : 경로 p에 대한 경험정보 기반 효용

$\alpha_{ut}$  : 현재정보 선호도 관련 파라미터

### 3) 동적 네트워크 통행량 부하

동적 통행량 부하는 분석시간 동안 기점을 포함한 의사결정 노드에서 계산된 경로교통량을 네트워크에 배정하는 과정으로서 이를 통해 시간중속 링크 교통량, 링크 통행시간과 경로통행시간 등의 산출을 도모할 수 있다. 본 연구의 통행량부하 모형은 링크 통행시간을 일시적으로 고정시킨 뒤 반복적인 과정을 통해 상태변수들을 결정하며, 이 과정에서 정보취득 지점에서의 경로변경 및 앞막힘 현상 등을 고려한다.

#### (1) 링크 동적 상태 방정식

링크 a에 대한 동적 상태 방정식은 주어진 이산적 시간에서 링크 유출입 교통량의 변화에 따른 링크 차량수의 형태로 표현된다.

$$x_{ap}^{Od}(k+1) = x_{ap}^{Od}(k) + u_{ap}^{Od}(k) - v_{ap}^{Od}(k) \quad (13)$$

여기에서,

$x_{ap}^{Od}(k)$  : 경로선택 노드- 종점 연계 경로상의 링크 대기차량

$u_{ap}^{Od}(k)$  : 경로선택 노드- 종점 연계 경로상의 링크 유입차량

$v_{ap}^{Od}(k)$  : 경로선택 노드- 종점 연계 경로상의 링크 유출차량

$O = \{o, o^*\}$  : 기점과 정보제공 노드 집합

**(2) 교통량 보존 방정식**

링크 유입교통량은 해당링크가 주어진 경로상의 첫 번째 링크일 경우 경로교통량과 동일하며 그렇지 않을 때에는 이전 연결링크의 유출교통량과 동일하다.

$$\begin{aligned}
 u_{ap}^{Od}(k) &= h_p^{Od}(k) \quad , \quad a \in A(O) \\
 &= v_{a^+}^{Od}(k) \quad , \quad a \notin A(O), a^+ \in L_p^{Od}
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

여기에서,

$A(O)$  : 링크 시점 노드가 경로선택 노드인 경우

$a^+$  : 링크 a의 이전 연계 링크

$L_p^{Od}$  : 경로 p상의 링크 집합

**(3) 교통량 전파 제약조건**

$$U_{ap}^{Od}(k) = \sum_{j=0}^{k-1} u_{ap}^{Od}(j) \tag{15}$$

$$V_{ap}^{Od}(k) = \sum_{j \in \{i | 0 \leq j \wedge T_a(j) \leq k \wedge \}} u_{ap}^{Od}(j) \tag{16}$$

$$v_{ap}^{Od}(k) = V_{ap}^{Od}(k) - V_{ap}^{Od}(k-1) \tag{17}$$

$$x_{ap}^{Od}(k) = U_{ap}^{Od}(k) - V_{ap}^{Od}(k) \tag{18}$$

여기에서,

$U_{ap}^{Od}(k)$  : 누적 유입교통량

$V_{ap}^{Od}(k)$  : 누적 유출 교통량

$\Delta$  : 통행량 부하 단위시간

**(4) 경로선택 노드 교통량 보존 방정식**

경로결정은 통행전 선택지점인 기점노드와 통행중 선택지점인 정보취득 노드에서 이루어진다. 이중 기점노드인 경우 통행발생이 외생적으로 정의되므로 기점노드에 대한 교통량 보존은 기점을 시작노드로 하는 링크상의 모든 경로 통행량의 합으로 표현된다. 통행 중 경로선택 노드에서의 통행 발생량은 경로교통량 부하결과에 의해 내생적으로 정의되는데, 경로교통량 중 정보제공 지점을 유출 노드로 하는 링크상의 유출교통량의 합으로 표현된다.

$$\sum_{p \in P^{od}} u_{ap}^{od}(k) = D^{od}(k), \quad a \in A(o) \quad (19)$$

$$\sum_{a \in B(o^*)} v_{ap}^{Od}(k) = D^{o^*d}(k+1) \quad (20)$$

여기에서,

$B(o^*)$  : 링크 종점부가 통행 중 경로선택 노드인 경우

### (5) 기타 제약조건

- 변수 정의에 따른 제약조건

$$\sum_{Od_p} u_{ap}^{Od}(k) = u_a(k) \quad (21)$$

$$\sum_{Od_p} v_{ap}^{Od}(k) = v_a(k) \quad (22)$$

$$\sum_{Od_p} x_{ap}^{Od}(k) = x_a(k) \quad (23)$$

- 비음 제약조건

$$x_{ap}^{Od}(k) \geq 0, \quad u_{ap}^{Od}(k) \geq 0, \quad v_{ap}^{Od}(k) \geq 0 \quad (24)$$

- 초기조건

$$x_{ap}^{Od}(0) = 0, \quad U_{ap}^{Od}(0) = 0, \quad V_{ap}^{Od}(0) = 0 \quad (25)$$

### (6) 용량제약 및 보정 조건

본 연구의 통행량 부하과정에 포함되는 통행시간 보정은 수용용량을 초과하는 하류부 대기행렬의 물리적 증가에 따른 이전 연계링크의 유출용량 감소를 의미하며, 유입교통량이 앞막힘에 의해 경험하게 되는 추가 지체의 산정은 앞막힘 발생링크의 수직대기행렬(vertical queue) 소거시간으로 정의한다. 따라서 링크 하류부의 앞막힘 현상에 의한 상류부 추가 지체 계산은 하류부 링크 특성에 따라 각각 다음과 같이 계산된다.

- 제어링크의 경우

$$\Delta T_{a+}(k) = \text{Max} \left[ x_a^1(k) - \frac{l_a^1 \cdot n_a^1}{l_v}, 0 \right] \cdot \frac{\Delta k}{\sum_{a \in \{a \mid Q_a^1 \leq x_a\}} S_a \cdot g_a} \quad \forall a \in L_a^{in} \quad (26)$$

- 비 제어 링크의 경우

$$\Delta T_{a+}(k) = \text{Max} \left[ x_a(k) - \frac{l_a \cdot n_a}{l_v}, 0 \right] \cdot \frac{\Delta k}{Cap_a} \quad (27)$$

여기에서,

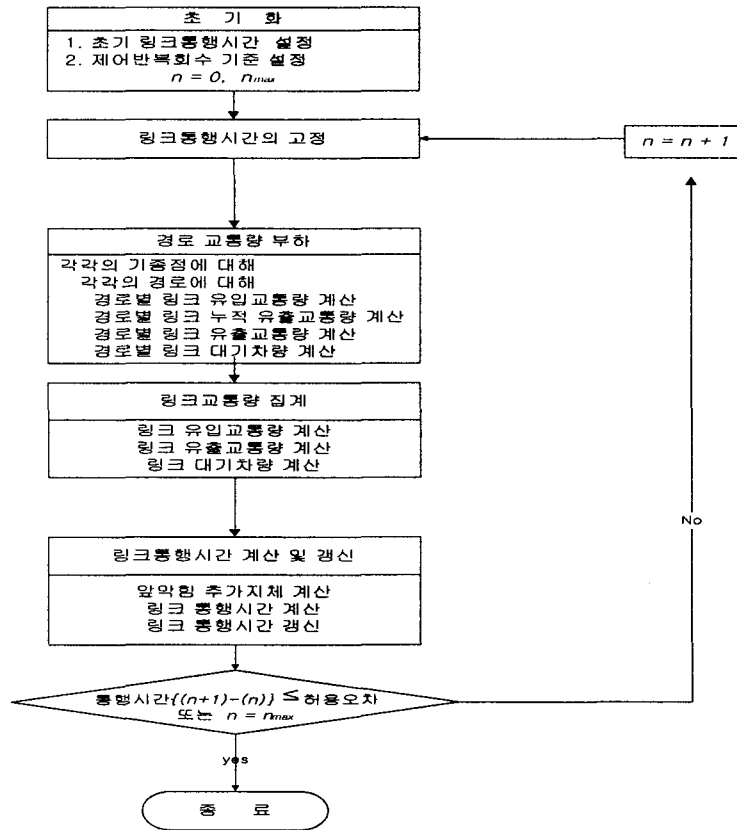
$\Delta T_{a+}(k)$  : 링크 a의 상류부 연계 링크 추가 통행시간

$l_a^1$  : 제어링크 a의 공통유입부 길이

$n_a^1$  : 제어링크 a의 공통유입부 차선 수

### (7) 동적 통행량부하 알고리즘

동적 통행량 부하는 경로선택 과정에서 계산된 통행량을 주어진 제약조건하에 네트워크에 부하하  
 되 반복적 과정을 통해 수렴기준 또는 최대반복 횟수에 도달할 때 종료한다.



<그림 2> 동적 통행량 부하 알고리즘

## 5. 네트워크 동적 제어모형

### 1) 제어모형의 구조

본 연구에서는 현재 제어정보를 기반으로 한 통행자의 경로선택과 이러한 경로선택 결과를 고려한 제어모형의 결합으로 이루어진다. 단위 제어주기 동안 예측된 교통량을 기반으로 하여 제어모형

을 적용하는데, 제어변수의 갱신은 링크 통행량의 변화를 초래하나 링크 통행함수의 변화에 대한 링크 통행량의 재 산정은 경로변경에 따른 통행량의 변화가 아닌 링크 통행시간 변화에 따른 통행량 전이 과정의 변화를 의미한다.

본 연구에서는 단위 제어주기 동안에 상태변수의 변화를 감안한 제어변수의 설계를 통해 네트워크 총 통행시간 최소화를 도모하는 순간 최적(instantaneous optimal) 제어를 실시한다.

$$\text{Minimize } Z = \sum_a u_a(t) \cdot T_a[u_a(t), x_a(t), \Psi_a(t)] \quad (28)$$

$$\text{s.t. } \Psi_a \in \Omega_\Psi, \quad x_a(t) \in \Omega_x$$

여기에서,

$\Psi_a$  : 링크 a의 제어변수

$\Omega_\Psi, \Omega_x$  : 제어변수 및 상태변수 제약조건 집합

제어변수와 상태변수를 분리하여 최적화 하는 Decomposition 방법을 사용할 경우 최적해 도출과정은 제어변수의 제약조건을 기초로 한 Hamiltonian 함수 형태를 취하여, 일차필요조건인 제어변수에 대한 한계링크 비용이 최소가 되는 제어변수 값을 산출하면 된다.

그러나 시뮬레이션 기반의 최적화 모형의 경우 교통특성에 따른 링크간의 상호작용 등으로 인해 모든 제어변수에 대한 링크통행함수의 미분 값을 용이하게 얻을 수 없으며, 또한 과도한 대기행렬 발생 등과 같은 네트워크 교통특성에 따라 다른 링크와의 상관관계에 의한 비대칭(asymmetric), 비분리(non-separable) 특성을 갖게 될 경우 전체 목적함수에 대한 효율적인 가능해 탐색 정보를 얻지 못하게 된다. 아울러 도시고속도로축의 경우 링크 통행함수는 연속류와 단속류라는 특성화 된 함수 구조에 의해 서로 상이한 제어 특성을 보이므로 교통축 전체를 대상으로 하는 단일화된 최적화 기법의 적용은 매우 어렵다.

따라서 본 연구에서는 도로별 제어특성의 상이성을 감안하여 각기 독립된 제어전략의 수립과 단위 제어주기 동안의 동적 통행배정 모형을 이용하여 도출된 교통량을 이용한 개별적 최적화 과정을 수행하되, 제어변수 변화에 대한 네트워크 동적 상태변화를 반영하기 위해 통행량 부하를 반복 시행하는 반복제어 구조를 취한다.

## 2) 신호교차로 지체최소화전략

접근로 지체최소화 전략은 신호교차로에 적용되는 제어전략의 일환으로서 목적함수 중의 하나로써 비 포화 신호링크의 경우 통행시간 최소화를 도모할 수 있는 효율적인 제어전략으로 다음과 같은 모형 구조를 갖는다.

$$\text{Minimize } Z_{delay} = \sum_{a \in L^m} u_a \cdot T_a^2(g_a) \quad (29)$$

$$\text{s.t. } g_a = \sum_{\phi \in \Phi^m} g_\phi^m \cdot \delta_{\phi, a}^m$$

$$\sum_{\phi \in \Phi^m} g_\phi^m = 1$$

$$g_\phi^{m, \min} \leq g_\phi^m \leq g_\phi^{m, \max}$$

여기에서,

$L^m$  : 교차로 m에 포함되는 링크들의 집합

$g_\phi^m, g_\phi^{m, \min}, g_\phi^{m, \max}$  : 교차로 m의 현시  $\phi$ 의 녹색시간 비(최소, 최대)

$\delta_{\phi, a}^m$  : 링크 a에 제공되는 녹색신호 현시 유무

적정 녹색시간 산정은 교차로 현시별 한계지체시간과 평균값을 설정한 후 현시별 한계지체시간의 균등화를 위해 등제약조건(binding constraint)의 경계면에서 접평면에 대한 목적함수의 gradient를 투영하는 Gradient Projection 알고리즘을 이용한다.

$$g_\phi^{m, (n+1)} = g_\phi^{m, (n)} + \alpha^{(n)} \cdot d_\phi^{m, (n)} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} d_\phi^{m, (n)} &= - \left\{ \frac{\partial Z}{\partial g_\phi^m} - \frac{1}{|\Phi^m|} \sum_{\phi \in \Phi^m} \frac{\partial Z}{\partial g_\phi^m} \right\} \\ &= \left\{ I_{d, \phi}^{m, (n)} - \overline{I_d^m} \right\} \end{aligned} \quad (31)$$

$$I_{d, \phi}^m = \sum_a -u_a \cdot \frac{\partial T_a^2}{\partial g_a} \cdot \delta_{\phi, a}^m \quad (32)$$

$$\overline{I_d^m} = \frac{1}{|\Phi^m|} \sum_{\phi \in \Phi^m} I_{d, \phi}^m \quad (33)$$

여기에서,

$I_{d, \phi}^m$  : 현시별 한계지체

$\overline{I_d^m}$  : 교차로 현시별 한계지체 평균

$|\Phi^m|$  : 교차로 m의 현시 수

$d_\phi^{m, (n)}$  : 가능해 탐색 하강방향

$\alpha^{(n)}$  : 이동규모

### 3) 대기행렬 제어전략

대기행렬 제어는 과포화 네트워크를 대상으로 한 제어전략으로서 대기행렬 발생에 따른 공통유입부 통행시간의 증가와 앞막힘 현상 발생에 따른 연계 교차로 통행시간 증가를 고려한 제어전략이다. 지체최소화 전략이 링크의 물리적 공간에 대한 고려가 없는 반면 대기행렬 제어는 링크 상류부의 교통상태를 반영할 수 있어 링크 상류부에서 대기행렬로 인한 통행시간 증가가 클 경우 네트워크 총 통행시간 최소화에 효과적으로 활용될 수 있다. 본 연구에서 대기행렬 제어전략은 링크 유입량과 대기행렬 점유비의 곱으로 구성된 대기행렬 강도를 최소화하는 녹색신호 분할을 실시한다.

$$\text{Minimize } Z_{\text{queue}} = \sum_{a \in L^m} u_a \cdot \frac{x_a^2(g_a) \cdot l_v}{n_a^2 \cdot l_a^2} \quad (34)$$

$$\text{s.t. } g_a = \sum_{\phi \in \emptyset^m} g_\phi^m \cdot \delta_{\phi, a}$$

$$\sum_{\phi \in \emptyset^m} g_\phi^m = 1$$

$$g_\phi^{m, \min} \leq g_\phi^m \leq g_\phi^{m, \max}$$

그러나 제어변수인 녹색시간 비와 상태변수인 대기차량간의 상관관계에 대한 해석적 결과를 직접적으로 도출할 수 없을 수 없기 때문에 본 연구에서는 현시별 대기행렬 강도 기반의 신호분할을 실시하였다.

$$I_{q, \phi}^m = \sum_a u_a \cdot \frac{x_a^2(g_a) \cdot l_v}{n_a^2 \cdot l_a^2} \cdot \delta_{\phi, a} \quad (35)$$

$$g_\phi^m = g_\phi^{m, \min} + \frac{I_{q, \phi}^m}{\sum_{\phi \in \emptyset^m} I_{q, \phi}^m} \cdot \left\{ 1 - \sum_{\phi \in \emptyset^m} g_\phi^{m, \min} \right\} \quad (36)$$

#### 4) 도시고속도로 진입제어전략

진입제어의 목적함수는 램프 진입차량과 본선 주행 차량에 대한 총 통행시간 최소화로 설정하되, 미터링의 일반적 제약조건인 고속도로 본선 구간에 대한 용량제약 조건을 배제하며, 제어변수로는 진입램프에서의 녹색신호시간 비를 사용한다. 램프미터링의 경우 녹색신호시간 제공에 따른 본선구간의 영향은 차량 진입 이후 하류부 링크에서 발생하는 지체시간 증가로 나타나므로 상태방정식을 고려한 최적화 과정이 요구된다.

$$\text{Minimize } Z_{\text{time}} = \sum_{a \in L^{\text{ramp}}} \{ T_a(g_a) \cdot u_a + T_{a-}(u_{a-}) \cdot u_{a-}(g_a) \} \quad (37)$$

$$\text{s.t. } g_a^{\min} \leq g_a \leq 1$$

$$u_{a-} = v_b + \text{Min}[x_a, S_a] \cdot g_a$$

여기에서,

$u_a$  : 진입램프 a와 연계된 본선 하류부 링크의 유입교통량

$v_b$  : 진입램프 a와 연계된 본선 상류부 링크의 유출 교통량

$L^{\text{ramp}}$  : 고속도로 진입램프 링크 집합

제어주기 동안 고속도로 전체에 대한 최적화 수행을 위해서는 램프간 동적 OD를 기반으로 하는 동적 상태방정식이 요구되나 본 연구에서는 단위 제어주기 동안의 진입램프에 대한 순간적 제어를 실시하며, 고속도로 전체구간에 대한 동적 상태의 고려는 제어변수의 변경과 이에 따른 동적 통행량 부하 결과의 활용 등을 반복 수행한다.

상기 모형에서 진입램프의 유출교통량이 교통상황에 따라 결정되므로 상기의 상태변수 관련 제약식은 이진변수(binary variable)를 포함하는 혼합정수형태의 선형제약 조건과 비선형 목적함수를 갖는 혼합정수형 비선형계획법(MINLP)의 형태를 보인다.

본 연구에서는 상기의 혼합정수형 비선형계획법 문제를 풀기 위해 랜덤 탐색을 실시하며, 탐색방법으로는 ES (Evolution Strategy) 알고리즘을 이용한다. ES 알고리즘은 선택과 변동을 사용한 랜덤 탐색과정으로서 작은 변동은 평균값 0을 갖는 정규분포에서 랜덤하게 선택되며, 선택된 값은 연속변수 값에 더해져서 도태과정을 통해 불량한 해는 제거되고 양호한 해를 중심으로 다시 탐색과정을 진행하게 된다.

진입램프 제어모형의 경우 ES 알고리즘 내의 개체 구성은 제어변수, 전략변수 그리고 목적함수의 우성도로 이루어진다.

$$a_k^{(t)} = [\Psi_{ramp}, s_{ES}, Z_f(\Psi_{ramp})]^{(t)} \in P_{ES}^{(t)} \quad (38)$$

여기에서,

$a_k^{(t)}$  : 재생성 주기 t 동안의 k 번째 개체

$\Psi_{ramp}$  : 제어변수 (진입램프 녹색시간비)

$s_{ES}$  : 전략 파라미터(strategy parameter)

$Z_f(\Psi_{ramp})$  : 목적함수(고속도로 총 통행시간)

$P_{ES}^{(t)}$  : 재생성 주기 t 동안의 개체군

제어주기 동안의 진입램프 미터링을 위한 녹색시간비는 램프별로 산출되므로 각 진입램프별로 1개의 부모와 1개의 자식으로 구성된 단순 ES 알고리즘의 실행을 통해 램프별 최적해를 산출한다.

### ES 알고리즘

1단계 : 초기화 과정

$$t = 0$$

$$\text{초기 개체군 생성 : } P_{ES}(0) := \{\Psi_{ramp}(0)\}$$

2단계 : Main Loop

$$2.1 \quad P_{ES}(t) \text{에 대한 변종 : } \Psi'_{ramp}(t) := \Psi_{ramp}(t) + c \cdot N(0, s_{ES}(t))$$

$$2.2 \quad P_{ES}(t) \text{에 대한 평가 : } Z_f(\Psi_{ramp}(t)), Z_f(\Psi'_{ramp}(t))$$

2.3  $P_{ES}(t+1)$ 의 선택과정 :

$$\text{만일 } Z_f(\Psi'_{ramp}(t)) \leq Z_f(\Psi_{ramp}(t)) \text{ 이면 } \Psi_{ramp}(t+1) = \Psi'_{ramp}(t)$$

$$\text{그렇지 않으면 } \Psi_{ramp}(t+1) = \Psi_{ramp}(t)$$

3단계 : 종료여부

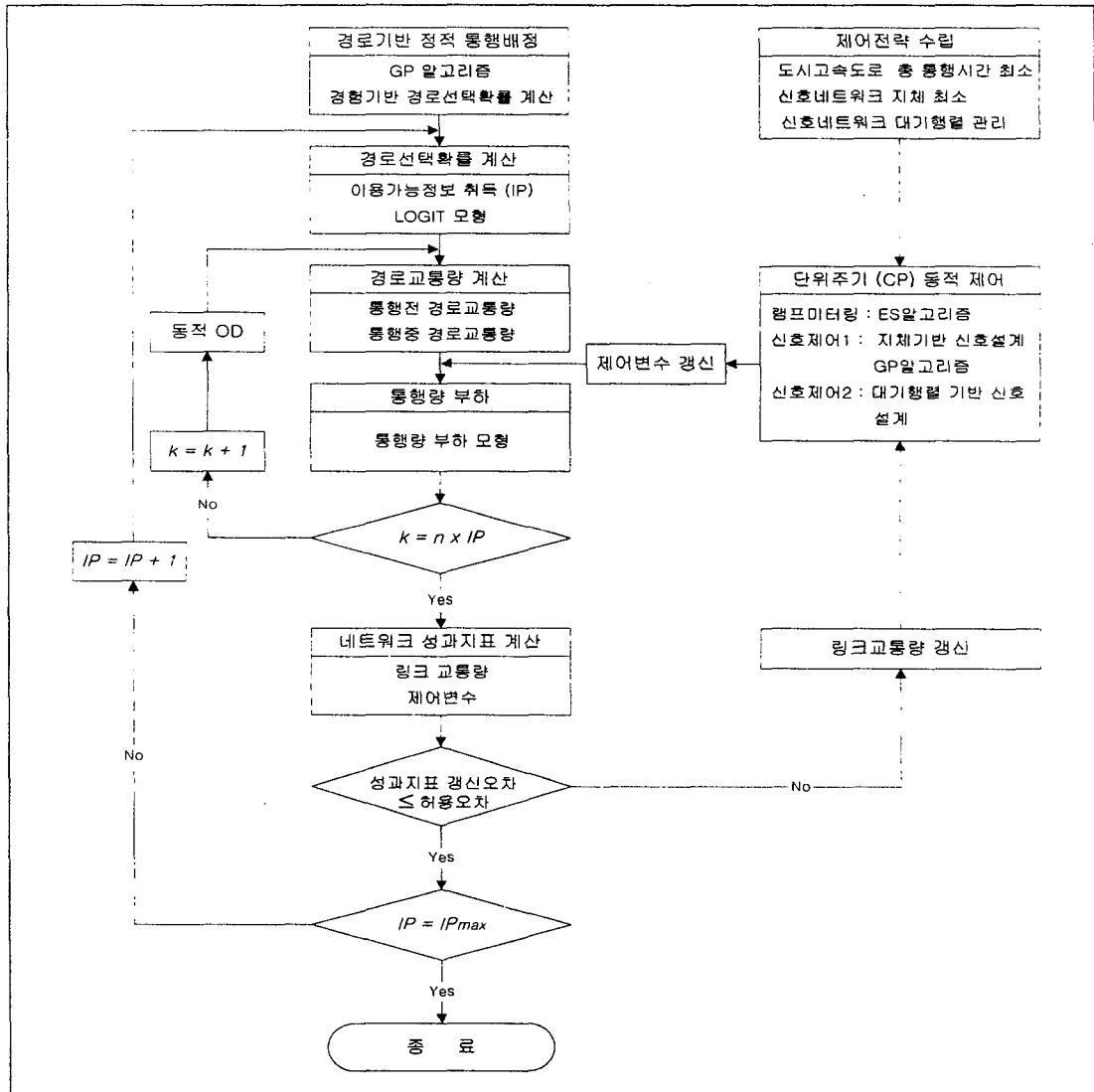
$$Z_f^{(t)} - Z_f^{(t-1)} \leq \epsilon_{ES} \text{이면 종료, 그렇지 않으면 } t := t+1 \text{ 단계 2로 진행}$$



## IV 동적 교통관리 알고리즘의 구성

### 1. 관리모형 전체 알고리즘의 구성

본 연구의 관리모형 내에 포함된 알고리즘은 크게 동적 통행배정 알고리즘과 동적 제어 알고리즘으로 구성된다. 동적 통행배정 알고리즘은 정보제공을 통한 네트워크 통행여건을 개선코자 하는 관리전략의 일환이면서 아울러 제어전략의 최적화 과정에서 필요한 상태변수를 제공한다.



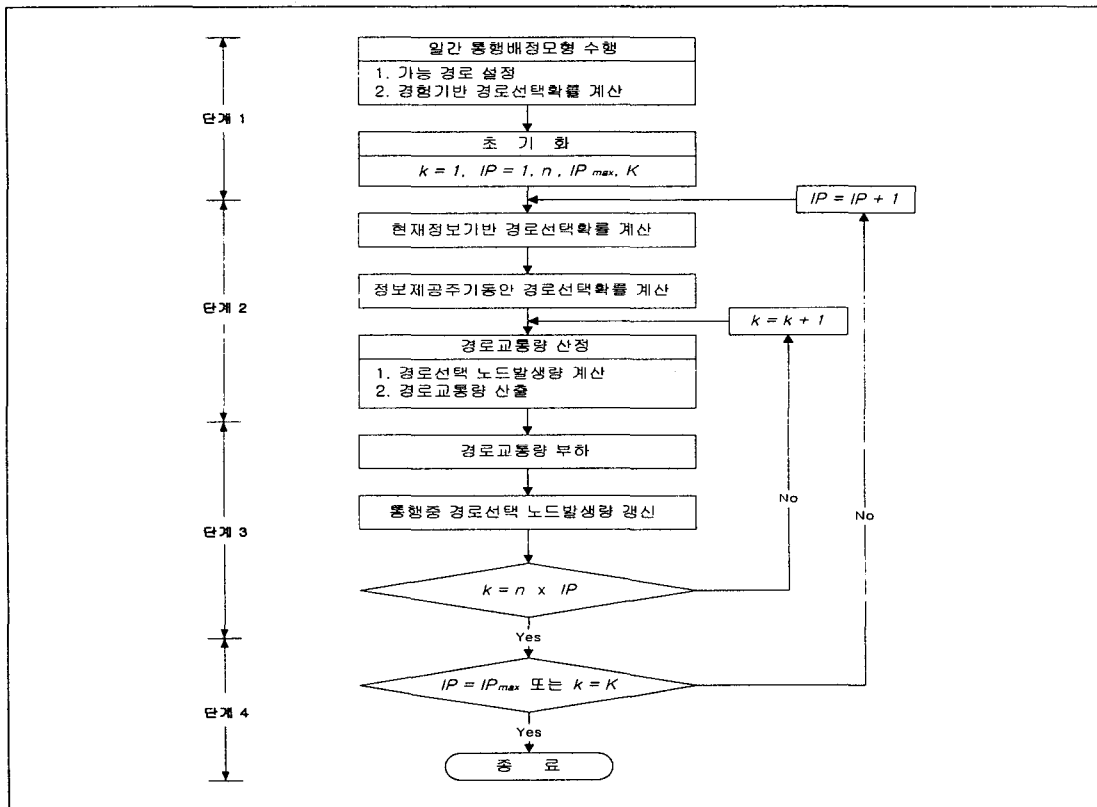
<그림 3> 동적 교통관리 알고리즘의 구성

## 2. 동적 통행배정 알고리즘

동적 통행배정 모형은 경험정보 기반의 선택확률(고정적)과 경로선택 노드에서 취득하게 되는 이전시간의 통행량 부하를 통해 도출된 경로별 시간을 이용한 현재정보 기반의 선택확률(가변적)을 이용하여 경로 교통량을 산정한다. 경로교통량은 각 기점 및 통행 중 경로선택 노드에서의 통행량으로 구성되는데, 각 기점에서의 발생량은 외생적으로 정의되는 반면에 통행 중 노드에서의 발생량은 이전시간 통행량 부하과정을 통해 내생적으로 결정된다.

산정된 경로교통량은 동적 통행량 부하 모형을 통해 네트워크에 부하되는데 정보제공 주기  $IP$ 는 통행량 부하주기  $k$ 의  $n$  배로 정의하며 현재 정보제공의 경우  $IP$  동안의 정보는 이전 정보주기  $IP-1$ 의 맨 마지막 통행량 부하 결과에 의한 정보를 사용한다. 따라서, 정보제공 단위 주기동안에는 동일한 경로 선택확률을 갖는  $n$ 번의 통행량 부하과정이 수행된다.

다음 정보제공 주기에서는 이전 정보주기의 마지막 통행량 부하결과에 의한 링크 통행시간들을 이용한 새로운 현재 기반 경로정보를 제공하게 되며 통행자는 이들 정보를 바탕으로 경로선택을 하게 된다.

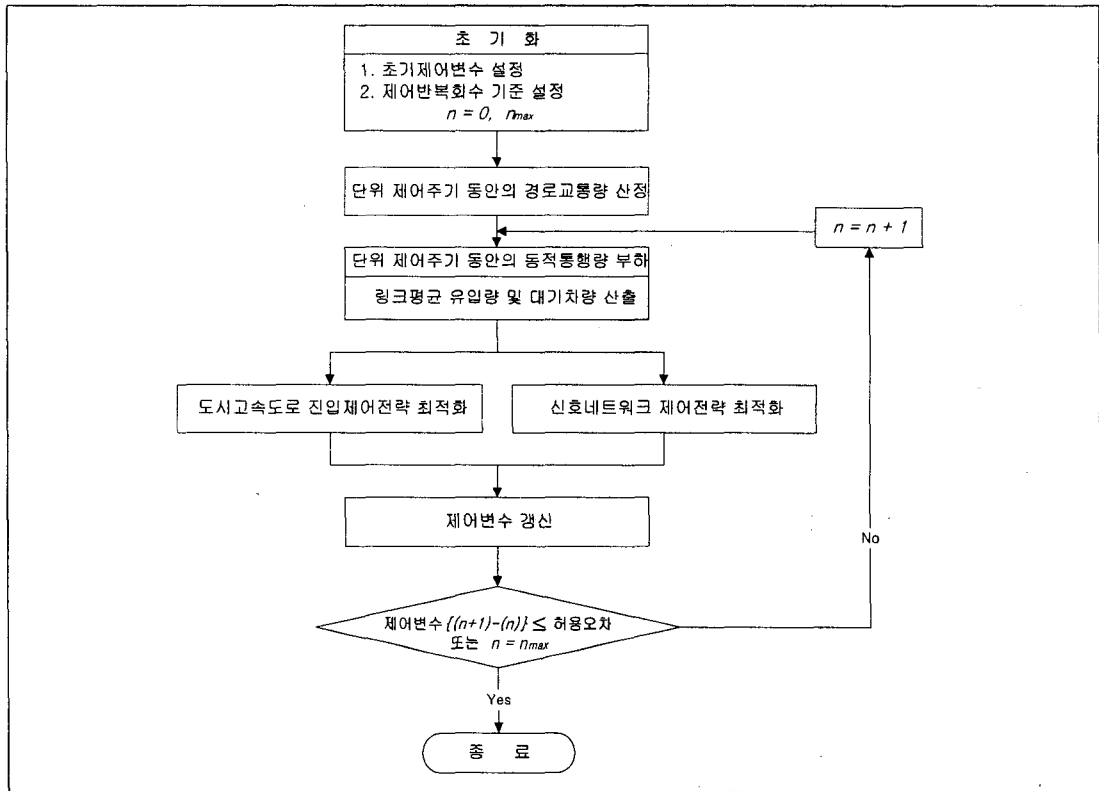


<그림 4> 동적 통행배정 알고리즘의 구성

### 3. 동적 제어 알고리즘

단위 제어주기 동안에 수행되는 제어전략의 최적화는 정적, 독립적 제어 문제로 진행되므로 네트워크에 대한 고려와 동적 특성을 반영하기 위해 최적화를 통해 도출된 제어변수들을 기반으로 한 통행량 부하를 다시 수행하는 반복제어(feedback control)의 구조를 취한다.

단위 제어주기 동안에 수행된 제어전략의 최적화는 네트워크 링크 평균 교통량이나 또는 제어변수의 변화 폭이 일정 수준에 이를 경우 종료하게 된다. 제어변수의 변화에 따른 네트워크 상태변수의 변화는 불가피한 것이나 통행자들의 경로선택 행태의 변화가 아닌 통행량의 상태전이 과정에서 발생하는 변화이므로 반복제어 과정에서 발생할 수 있는 수렴 문제는 어느 정도 해결할 수 있다. 통행량의 반복적 부하 과정에서 초래될 수 있는 제어변수의 갱신은 새로이 산출된 변수를 선택하는 것을 원칙으로 하나 만일 진동의 특성을 보일 경우에는 반복횟수에 따른 가중치를 적용하는 MSA(Moving Successive Average) 방법을 사용함으로써 수렴 속도를 증가시키거나 또는 강제적인 수렴을 도모한다. 따라서 제어과정의 수렴은 최대반복횟수에 도달하거나 반복과정에 도출된 최적제어변수의 변화 폭이 일정기준 이내일 때에 이루어지도록 한다.

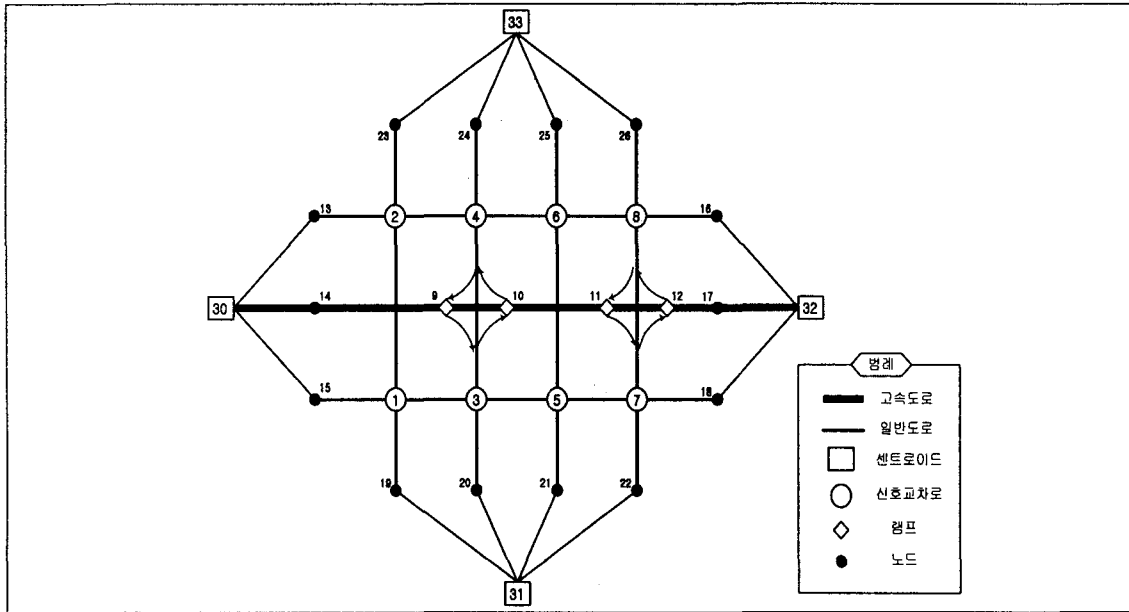


<그림 5> 동적 제어 알고리즘의 구성

## V. 동적 교통관리모형의 적용 및 평가

### 1. 분석환경 설정

도시고속도로와 신호가로간의 접근성이 충분히 보장됨으로서 통행 중 경로선택이 가능한 전형적인 도시고속도로축을 구성하는 가상 네트워크를 구현하며, 도시고속도로축의 수요변화와 유고발생에 따른 용량감소 등을 포함하는 시나리오를 설정하여, 본 연구의 관리모형에 대한 평가를 실시한다.



<그림 6> 가상의 도시고속도로 교통축

<표1> 관리모형 평가를 위한 교통여건 시나리오

용량감소 수요	기존	고속도로 30% 감소
기준수요	현재 안정적 상태 (시나리오 1)	신호가로 안정 고속도로 혼잡 (시나리오 4)
1.3배수요	신호혼잡 고속도로 안정 (시나리오 2)	신호가로 혼잡 고속도로 혼잡 (시나리오 5)
1.5배수요	신호가로 과포화 고속도로 혼잡 (시나리오 3)	신호가로 과포화 고속도로 과포화 (시나리오 6)

## 2. 관리모형의 적정성 평가

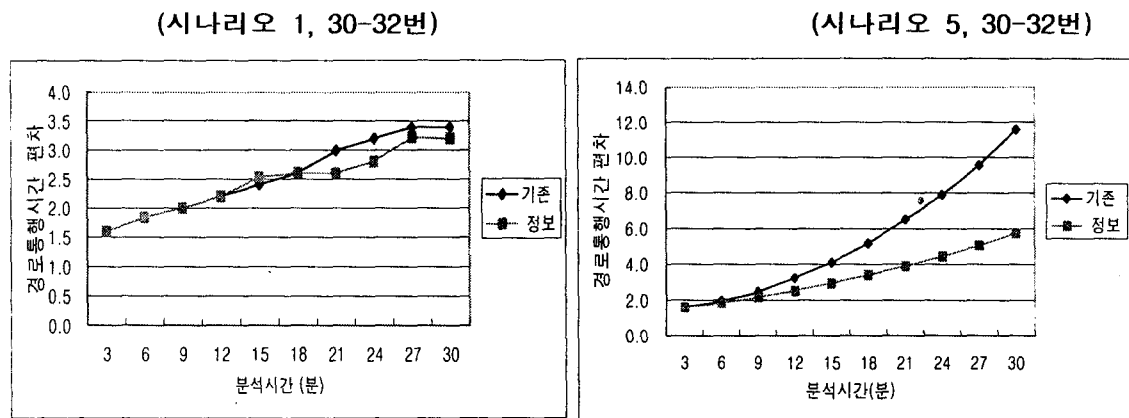
모형의 적정성 평가 기준으로 가장 효과적인 것은 모형의 실제적용에 따른 결과 비교이나 이는 현실적인 어려움을 갖고 있으므로 본 연구에서는 교통특성에 따른 관리모형 내 제어 및 상태변수의 합리성 여부를 기준으로 설정한다.

### 1) 정보제공 모형의 적정성

관리모형을 이용한 고속도로 진출입 램프상의 VMS를 통한 교통정보의 제공은 통행중 경로전환을 유도하여 고속도로 본선 이용경로와 대체도로 이용경로간의 경로통행시간 편차를 줄이는 것으로 분석되었다.

침두 방향인 30번 존과 32번 존을 연결하는 경로들에 대한 통행시간 편차를 분석한 결과 일상적 통행패턴과 유사한 시나리오 1의 경우 경험기반의 고정경로 선택에 의한 경로별 통행시간의 편차와 불완전 정보제공을 반영한 경로별 통행시간 편차는 비교적 안정적이며, 정보제공 유무에 따른 큰 차이는 없는 것으로 분석되었다. 그러나 일상적 통행패턴으로부터의 왜곡정도가 심한 시나리오 5의 경우 정보 미제공시에 비해 정보 제공에 의한 통행량의 분산을 통해 경로간 통행시간 편차의 폭을 줄이는 것으로 분석되었다.

이는 관리모형내의 통행중 교통정보의 제공을 통해 고속도로 이용자의 효율적인 경로선택을 통한 경로간 통행시간 편차 최소화를 도모할 수 있을 뿐만 아니라 교통량의 공간적 분산을 통해 교통충용량을 효과적으로 이용할 수 있음을 보여주는 합리적인 결과로 판단된다.



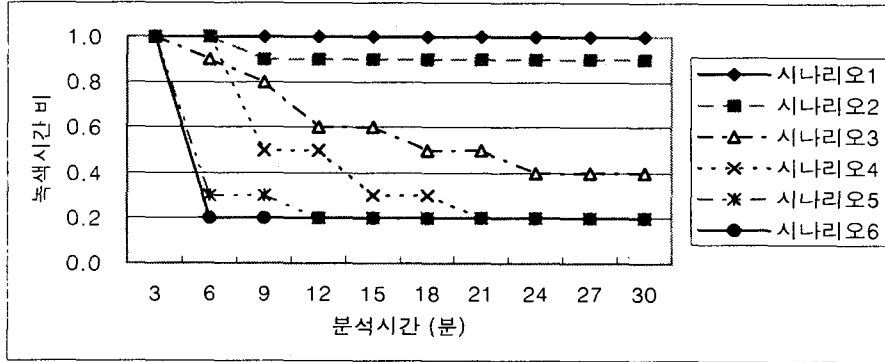
<그림 7> 시나리오별 경로 통행시간 편차 비교

### 2) 진입램프 제어모형의 적정성

본 연구의 관리모형에서 사용하는 진입램프 제어모형을 통한 시나리오별 녹색시간 비의 변화추이를 보면 고속도로 및 램프 교통량의 비포화 상태인 시나리오 1의 경우 최대 녹색시간 비(미터링 배제)를 보이며, 고속도로 본선혼잡 규모가 진입램프상의 혼잡 규모보다 상대적으로 매우 큰 시나리

오 5와 6의 경우 녹색시간 비는 최소 녹색시간 비를 보여 고속도로 본선용량 제약하의 진입램프 미터링과 유사한 결과를 보인다.

시나리오 2, 3, 4는 본선 용량을 다소 초과하는 수요발생 상황에서 진입램프 혼잡수준이 상대적으로 높은 경우와 낮은 경우이다. 기존의 본선 용량 제약하의 진입램프 미터링은 이러한 교통특성에서 최소 미터링을 산정하는 것이 일반적이나, 본 연구의 경우 네트워크 전체 측면에서 통행시간 개선을 도모하기 위해 최소, 최대 녹색시간 비 사이에서 적정수준의 값을 도출하였다.

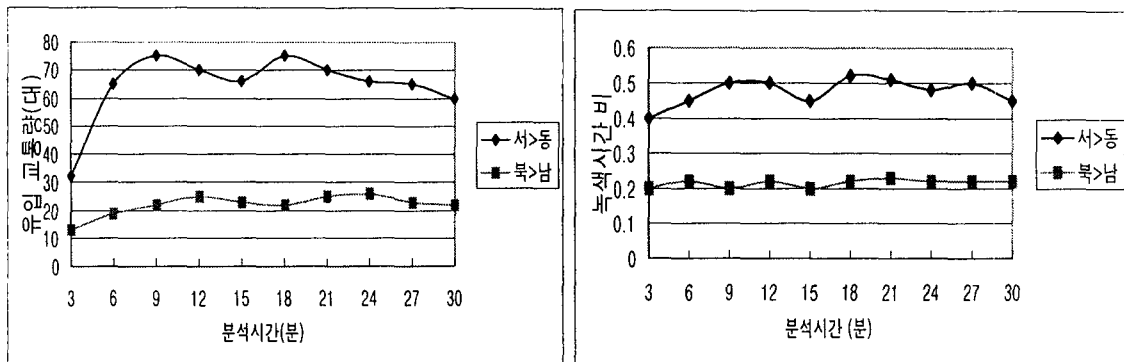


<그림 8> 시나리오별 진입 램프 녹색시간비 (10번 진입램프)

### 3) 신호제어 모형의 적정성 평가

관리모형의 신호제어 적정성 평가를 위해 접근로 총 지체최소화 전략을 사용하였다. 진입램프 주변의 5번 교차로를 예를 들어 살펴보면 교차로의 남북방향과 동서방향 링크 모두 동일한 접근로 처리 용량을 가지나, 시나리오 1인 상황에서 단위 분석시간별 유입교통량은 침두 방향인 서→동 방향이 비침두 방향인 북→남 방향으로 약 3배의 교통량을 보이며 지체 최소화 전략하의 녹색시간 비는 약 2~2.5배를 보인다. 이는 최소 녹색시간 비의 제약조건하에서 녹색신호 시간의 배분을 적절하게 반영하는 것으로 평가된다.

(시나리오 1, 5번 교차로 링크 유입교통량) (시나리오 1, 5번 교차로 링크 녹색시간 비)



<그림 9> 신호 교차로 녹색 신호설계

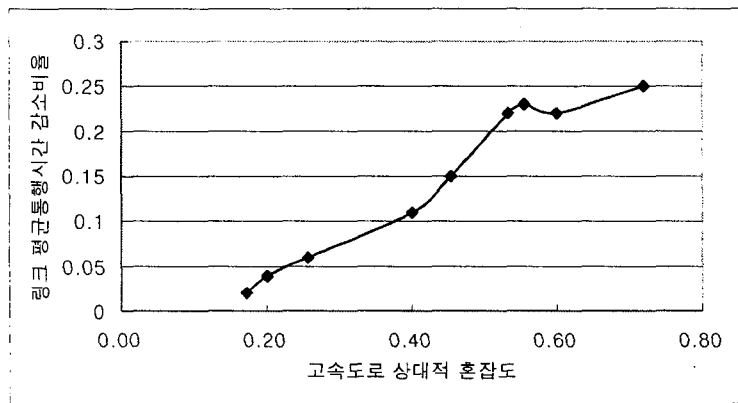
### 3. 관리전략의 평가

#### 1) 정보제공 전략의 평가

도시고속도로 축을 대상으로 한 정보제공은 일상적 통행패턴에서 많이 왜곡될 수록 네트워크 통행여건 개선에 효과적인 것으로 분석되었다. 도시고속도로축을 구성하는 신호가로와 고속도로간의 포화도를 이용하여 고속도로의 상대적 혼잡도를 설정한 후 이를 바탕으로 경로정보 제공에 따른 네트워크 링크 평균통행시간 감소 효과를 비교하였다.

$$\text{고속도로 상대적 혼잡도} = \frac{(\text{고속도로 포화도})^2}{\text{고속도로 포화도} + \text{신호도로 포화도}}$$

통행중 정보체계는 고속도로의 상대적 혼잡도가 증가함에 따라 교통축 통행여건 개선에 효과적인 것으로 평가되며, 아울러 본선구간의 유고발생과 같은 심각한 혼잡수준에서는 완전정보 체계하의 경로안내 시스템에 따른 네트워크 개선효과에 근접할 것으로 판단된다.

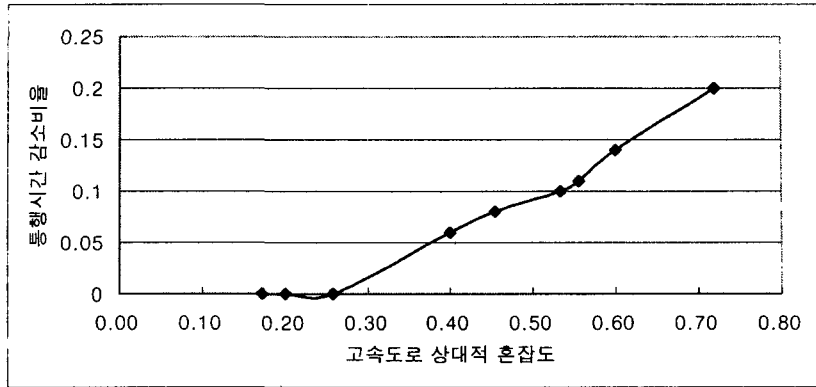


<그림 10> 정보제공에 대한 네트워크 개선효과

#### 2) 램프미터링 전략의 평가

도시고속도로 본선 및 진입램프 구간의 통행시간을 최소화하는 진입램프 미터링의 도입은 교통축의 통행여건에 따라 개선효과의 다양성을 보이는데, 고속도로 본선구간의 교통상태 악화와 대체 간선도로의 교통상태 양호인 경우에 가장 효율적인 것으로 분석된다.

고속도로의 상대적 혼잡도의 증가는 본선구간의 혼잡도가 증가하는 반면에 주변 대체도로의 혼잡도가 감소할 경우로서 이는 기존의 램프미터링 실시의 기본적 전제조건을 만족시킨다.



<그림 11> 램프 미터링 실시에 따른 네트워크 개선효과

### 3) 신호 제어전략의 평가

신호제어 전략의 효과적 비교를 위해 진입램프 주변의 5번 교차로를 대상으로 하여 총 수요의 변화와 다른 관리전략과의 결합형태에 따른 분석을 실시하였다.

분석결과를 보면 단순히 수요만을 증가시킬 경우 지체최소화 기반 신호설계는 기존 신호설계 요소에서 비해 큰 개선효과를 보이지 않는 것으로 분석되었으며, 오히려 정보제공 또는 램프미터링 등을 통한 신호교차로 통행패턴의 변화를 도모할 경우, 즉 특정 접근로의 수요 패턴이 상이할 경우 신호제어 효과가 큼을 보여준다.

대기행렬 기반 제어전략은 포화도가 낮을 경우 비효율적이거나 접근로 길이가 짧으며 포화도가 높을 경우 효과적인 제어전략으로 평가될 수 있음을 보여준다. 이 전략은 링크길이와 같은 네트워크의 물리적 특성에 민감하기 때문에 수요/용량 비 또는 포화교통류비 등의 일반화된 지표로서 제어전략 도입의 당위성을 갖는 교통여건을 표현하는데 다소 한계를 갖는다.

<표 2> 5번 교차로 링크 평균통행시간 비교

수요	관리전략	기존신호	지체최소제어	대기행렬 제어
기준수요 (시나리오4)	기존	1	0.98	1.01
	정보제공	1	0.96	1.01
	정보제공 + 램프미터링	1	0.94	1.01
1.5배수요 (시나리오6)	기존	1	0.98	0.99
	정보제공	1	0.94	0.93
	정보제공 + 램프미터링	1	0.92	0.90



## 4. 관리모형의 실제 네트워크 적용

### 1) 분석네트워크

본 연구의 실제 사례 네트워크로서 현재 서울시의 대표적 도시고속도로인 내부순환도로를 선택하였다. 내부순환 고속도로 대상 구간은 서울시 북부 구간 중 어느 정도 대체도로의 연속성이 보장되는 성산~연희~홍제~홍은 램프구간을 대상으로 한다. 분석 네트워크에 포함된 램프 중 서→동으로 진행되는 본선(내선)으로의 진입은 성산, 연희, 홍은램프에서 가능하나 유출은 홍제 램프에서만 가능하며, 본선(외선)의 경우에는 반대의 경우를 보인다. 따라서 램프간 동적 경로선택을 반영하기 어려운 네트워크 구조를 취하고 있다.

진출입 램프간의 거리가 멀수록 특정 기점 발생 수요는 특정 진입램프만을 선호하게 되며, 종점 도착수요의 경우 또한 특정 진출램프만을 고집하게 되므로 도시고속도로 교통축 상에서의 경로선택은 단순화된다. 경로선택의 단순화는 open 네트워크의 특성이 큼을 보여주는데, 본 연구에서 내부순환도로 네트워크의 구성은 교통축을 중심으로 한 open 네트워크의 형태를 취하도록 하여 평가의 초점을 본선구간과 대체도로 구간에 중점을 두며 그 밖의 주변 네트워크에 대한 고려는 단순화하였다.

분석 네트워크는 14개의 센트로이드와 17개의 신호교차로를 포함한 30개의 노드로 구성되며 접근로를 고려한 170개의 링크로 구성된다.

### 2) 분석 시나리오 설정

동적 교통관리 모형 적용은 현재의 네트워크 교통특성을 전제로 하여 고속도로 일부구간에 대한 유고를 발생시키는 시나리오와 도시고속도로 이용수요 증가 및 유고발생에 따른 시나리오를 대상으로 하여 본 관리모형 도입의 유용성을 평가한다.

- 시나리오 1 : 현재 교통여건 + 홍제 → 연희램프 구간 2차선 폐쇄
- 시나리오 2 : 정릉 → 성산 방면 도시고속도로 이용 수요 2.5배 증가  
+ 홍제 → 연희램프 구간 1개 차선 폐쇄

시나리오 1은 내부순환 도시고속도로 교통축의 현재 교통여건 반영을 위한 것으로서 비교적 통행여건이 양호한 내부순환도로 일부 구간에 대한 유고발생에 따른 용량감소시 관리모형 적용의 유용성을 검토한다. 그리고 시나리오 2는 향후 내부순환도로 이용수요 증가에 대한 고려와 함께 유고발생시 모형적용을 통한 네트워크 개선효과를 평가한다.

한편, 관리모형은 신호제어 전략에 따라 다음과 같이 구분한다.

- 관리모형 1 : 지체최소화 신호제어 포함
- 관리모형 2 : 대기행렬 기반 신호제어 포함

### 3) 분석결과

내부순환 도시고속도로 교통축의 교통현황은 주변 대체 신호도로의 혼잡에도 불구하고 고속도로 진출입을 위한 연계체계의 부족 등으로 인해 본선구간은 양호한 교통상태를 보여 홍은~성산램프까

지의 경로간 통행시간 편차가 매우 큰 것으로 분석된다.

고속도로 본선상의 일부구간에서 발생한 유고로 인해 고속도로를 이용하는 경로통행시간이 급격히 증가하였으나 이 경우에도 주변 대체도로를 이용한 경로 통행시간 보다 짧은 것으로 분석된다.

관리모형의 적용은 11 -12% 가량의 통행개선 효과를 보이는 것으로 분석되는데, 이는 경로정보 제공을 통한 고속도로 이용 교통량의 경로변경 보다는 오히려 진입램프 미터링을 통한 램프 이용 교통량의 우회를 도모한 결과로 평가된다.

한편 지체최소화 전략을 기반으로 하는 관리모형 1과 대기행렬 제어를 기반으로 하는 관리모형 2 간의 차이는 거의 없는 것으로 나타났는데 이는 분석 교통축의 신호 네트워크의 포화도가 전반적으로 높기 때문인 것으로 분석된다.

**<표 3> 시나리오1의 관리모형 적용 결과**

성과지표		기준	유고발생	관리모형 1	관리모형 2
경로통행시간	고속도로	6.7분	17.4분	8.3분	8.3분
	신호도로	23.2분	23.2분	27.0분	27.4분
네트워크 링크 평균 통행시간		128초	192초	172초 (12%)	174초 (11%)

시나리오 2에서는 유입 교통량 증가와 고속도로 본선구간의 유고로 인해 고속도로 이용경로의 통행시간이 대체도로에 비해 열악한 상황으로서 관리모형 적용시 17-18% 가량의 통행시간 개선효과를 보인다. 시나리오 2의 경우 경로 정보제공을 통한 본선이용 차량의 우회효과를 도모할 수 있으며, 진입램프 미터링과 신호네트워크 제어를 통해 시나리오 1에 비해 혼잡 개선 효과가 더 큰 것으로 분석되었다. 신호제어전략의 경우 대기행렬 기반의 신호제어를 사용하는 관리모형 2가 좀 더 개선된 결과를 보이는데 이는 진출램프를 이용하여 우회하는 교통량의 증가와 진입램프에서 미터링 실시로 인한 진입차량 들의 우회로 인해 진출입 램프 주변의 신호 교차로의 혼잡도가 증가했기 때문이다.

**<표 4> 시나리오 2의 관리모형 적용 결과**

성과지표		기준	수요증가 + 유고발생	관리모형 1	관리모형 2
경로통행시간	고속도로	6.7분	28.7분	20.2분	20.2분
	신호도로	23.2분	25.9분	31.9분	31.6분
네트워크 링크 평균 통행시간		128초	287초	236초 (17%)	234초 (18%)

## VI. 결론

본 연구는 서로 이질적인 교통 및 제어특성을 갖고 있는 도시고속도로 축을 대상으로 하는 동적 교통관리모형의 개발과 관리전략의 평가를 목적으로 하였다. 이를 위해 수요와 공급의 동적 변화를 효과적으로 반영할 수 있는 meso-scopic 시뮬레이션 모형 기반의 동적 통행배정 모형과 다양한 제어전략으로 구성된 동적 제어모형의 결합을 도모하였다.

가상 네트워크를 대상으로 하여 모형의 적정성을 검증한 결과, 관리모형의 제어 및 상태변수 값들은 교통특성에 따라 합리적인 결과를 도출하였다. 그리고 도시고속도로축의 통행여건 개선을 도모하기 위한 관리전략들을 평가한 결과 고속도로 본선구간 및 램프에 대한 통행 중 경로정보 제공은 통행량의 분산을 통해 네트워크 통행여건을 개선할 수 있으며, 진출램프를 통한 차량의 우회본선구간 경로통행시간이 대체도로에 비해 상대적으로 열악할 때 효과적인데 반해 진입램프 이용차량에 대한 우회정보 제공은 램프미터링과 병행하여 좀 더 효과적인 관리를 도모하는 것으로 평가된다. 고속도로 진입 교통량을 대상으로 하여 본선구간에 대한 용량제약을 포함하지 않고 본선구간과 진입램프의 통행시간을 함께 고려할 경우 네트워크 개선을 효과적으로 도모할 수 있는 것으로 평가된다.

신호제어의 경우 지체최소화 전략은 교통여건의 변화에 크게 민감하지 않고 효과적인 네트워크 개선을 도모할 수 있는 반면에, 대기행렬 제어전략은 교통특성의 변화에 민감한 결과를 보이는 것으로 분석된다. 특정 종점으로 유출하는 교통량의 대부분이 고정된 진출램프를 통해서 이루어질 경우, 진출 램프와 접속되는 신호간선도로를 대상으로 하는 대기행렬 제어전략은 네트워크 전체측면에서는 최적제어가 아닐지라도 유출램프를 대상으로 하는 우선 제어 전략으로 평가될 수 있으며 시스템 관리자의 입장에서 이에 대한 가중치를 부과할 경우 충분한 유용성을 갖는 것으로 판단된다.

한편, 연구수행 과정에서 파악된 한계점 및 향후 수행되어야 할 연구과제는 다음과 같다.

첫째, 동적관리모형을 구성하는 관련 모듈들에 대한 구체적 정산과정이 요구된다.

둘째, VMS 등과 같은 고정지점 정보제공과 차내 내비게이션(Navigation) 시스템 기반의 정보제공이 혼재된 동적 네트워크의 경로선택 반영에 관한 연구가 요구된다.

셋째, 전체 분석시간대를 대상으로 견실한 동적 시스템 최적화 알고리즘 개발이 요구된다.

## 참고문헌

- Abdelfatah, A. S. and Mahmassani, H. S. (1998). System optimal time-dependent path assignment and signal timing in traffic network. Transportation Research Record 1645, pp. 185-193
- Abdelghany, K. F., Valdes, D., Abdelfatah, A. S. and Mahmassani, H. S. (1998). Real-time dynamic traffic assignment and path-based signal coordination : Application to network management. Prepared for presentation at the 78th Annual Meeting of the Transportation Research Board
- Back, T., Rudolph, G. and Schwefel, H. P. (1993). Evolutionary programming and evolution

strategies - similarities and differences. Proceeding of the 2nd Annual Conference on Evolutionary Programming

Chang, G. L., Ho, P. K. and Wei, C. H. (1993). A dynamic system optimum control model for commuting traffic corridors, *Transportation Research 1C*, pp. 3-22

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*, pp. 42-51

Chang, G. L., Wu, J. and Cohen, S. L. (1994). Integrated real time ramp metering control for non-recurrent congestion: modeling and strategy development. *Proceedings of IVHS America Annual Meeting, 1994*. pp.867-877

Chen, O. J. (1998). Integration of dynamic traffic control and assignment. Ph. D. thesis, University of MIT

Gartner, N. H. and Al-Malik, M. (1997). Combined control and route assignment in traffic signal networks. In *Proceedings of the 8th IFAC symposium on transportation systems*, Chania, Greece.

He, Y. (1997). A flow-based approach to the dynamic assignment problem : Formulations, algorithms, and computer implementations. MST thesis, MIT.

Jayakrishnan, R., Tsai, W. K., Prashker, J. N. and Rajadhyaksha, S. (1994). Faster path-based algorithm for traffic assignment. *Transportation Research Record 1443*, pp. 75-83

Lee, C. (1998). Combined traffic signal control and traffic assignment : Algorithms, implementation and numerical results. Ph.D. thesis. The University of Texas at Austin

Papageorgiou, M. (1995). An integrated control approach for traffic corridors, *Transportation Research 3C*, 19-30

Ran, B. and Boyce, D. E. (1994). Dynamic urban transportation network models: Theory and Implication for Intelligent Vehicle-Highway System, *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, Springer Verlag

Schwefel, H. P. and Rudolph, G. (1996). Contemporary evolution strategies. *Evolutionary Programming*.

Stephanedes, Y. J. and Kwon, E. (1993). Adaptive demand diversion prediction for integrated control of freeway corridors, *Transportation Research 1C*, pp. 23-42

Yang, H. and Yagar, S. (1995). Traffic assignment and traffic control in saturated road networks. *Transportation Research 29A*, pp. 125-139