

■ 論 文 ■

# Cell Transmission 이론에 근거한 시스템최적 신호시간산정

Development of A System Optimum Traffic Control Strategy  
with Cell Transmission Model

**이 광 훈**

(서울시정개발연구원 선임연구위원)

**신 성 일**

(서울시정개발연구원 부연구위원)

## 목 차

- I. 서론
  - II. Cell Transmission 모형
  - III. 시스템 최적신호시간 산정모형의 구축
    - 1. 목적함수
    - 2. Cell Transmission 제약조건
    - 3. 신호운영 제약조건
  - IV. 실험계획
    - 1. 자료구축
    - 2. 결과분석
  - V. 결론
- 참고문헌

Key Words : Cell Transmission, 시스템최적, 신호제어전략, 경로선택, 과포화, 충격파, 혼합정수계획법

## 요 약

신호교차로로 구성된 네트워크의 시스템최적 신호시간산정을 위해 Cell Transmission 이론을 교통류 모형으로 활용한 신호최적화 모형을 제안한다. Cell Transmission 모형은 기존에 소개된 신호최적화 모형과는 달리 충격파, 대기행렬의 길이, 그리고 하류부 교차로 대기행렬의 역류(Spillback)과 같은 과포화 현상을 표현하는데 적절한 이론적이고 실제적인 배경을 지원한다. 모형에서 기점을 출발한 수요차량은 종점에 도착할 때까지 경로선택을 통해서, 그리고 신호시스템은 이러한 수요의 움직임 고려하여 신호시간요소의 최적화를 통한 네트워크의 비용을 최소화하기 위해 서로 협력한다는 의미에서 제안된 모형은 시스템 최적화를 의미한다. 모형은 혼합정수계획법으로 정식화되며 최적신호전략과 고정신호전략간의 실험계획을 통해 구축된 모형을 비교·평가한다.

## 1. 서론

도시가로망의 교통체증을 완화시키기 위한 방법으로 신호교차로의 신호시간을 개선하여 교통류의 원활한 흐름을 유지하려는 제어전략이 보편적으로 적용되고 있다. 이때 신호시간은 신호시간최적화 모형을 통해 계산되며, 교통상황에 따라 모형은 정주기식(TOD: Time of Table) 또는 교통수요대응식(TRC: Traffic Responsive Control) 제어방법에 적합하게 응용된다. 그밖에 교통량을 접근로 별로 감지하여 통행우선권(Right of Way)을 부여하는 감응식(Actuated)과 반감응식(Semi-Actuated) 제어전략도 신호시간최적화 모형을 통해 활용 가능하다. 또한 앞에서 열거한 신호전략의 장점을 취합하여 교통상황에 적합한 신호 제어전략을 구축하는 사례도 다양하게 개발되고 있다.

이러한 신호최적화 모형이 최적의 신호시간요소를 결정하기 위해서는 교통상황에 적합한 교통류에 대한 해석과 판단이 무엇보다도 중요하다. 교통류는 교통정체 측면에서 비포화, 근포화, 포화 및 과포화로 분류되며 링크 상에 전개되는 차량의 충격파(Shock Wave)의 이동방향에 따라 정체의 가중 또는 완화의 특성을 부가하여 다양한 교통류의 해석차원으로 확대된다. 먼저 교통류에 대한 해석이 전제된 후 신호최적화 모형은 최적의 신호시간을 도출하기 위해 시뮬레이션과 최적화기법 등을 활용하여 국지최적(suboptimal) 또는 최적(optimal)의 신호시간을 도출한다.

이러한 신호최적화 모형에서의 교통류에 대한 해석은 모형에 내제된 교통류를 재현하는 모형에 전적으로 의존한다. 신호에 의해 통제되는 단속 교통류의 해석 이론으로서 TRANSYT-7F(Wallace et al., 1998)의 차량군확산(Platoon Dispersion)이론, NETSIM(FHWA, 1989)의 차량추종(Car Following)이론, PASSER(TTI, 1991), MAXBAND(Little et al., 1981), MULTI-BAND(Gartner et al., 1991)의 평균통행속도(Mean Speed)의 적용에 의한 해석이 주류를 이루고 있다. 이중 차량군 확산이론과 평균통행속도는 기본적으로 저포화나 근포화에서 발생하는 단순한 교통현상을 가정하고 있어 과포화 현상과 같이 대기행렬의 역류현상(Spillback), 대기행렬의 길이의 예측, 그리고 충격파에 의한 혼잡을 집중 및 완화를 재현하지 못하므로, 과포화 교통상황에 따른 신호제어 전략에 이용되기에는 한계가 존재한다. 반면 차량추

종이론의 경우 개별차량의 움직임을 포착하여 과포화 현상에 대한 모형화가 가능하나 이들 차량의 특성을 최적화 모듈에 입력자료로서 활용해야 하는 부담 때문에 일부 시뮬레이션의 통한 시스템 평가기능 이외에는 아직 활용되지 못하고 있다. 결론적으로 단속류 교통망에서 거시적 차량군에 의한 교통류의 형태를 유지하면서 과포화 현상을 재현가능한 교통류 이론이 사실상 적절히 활용되지 못하고 있으며, 따라서 기존의 과포화 신호제어를 겨냥한 최적신호제어는 교통류의 정확한 해석적 본질에 근거하기보다는 가상적인 그림 안에서 실험적으로 이루어지고 있다고 볼 수 있다.

그런데 과포화를 포함한 다양한 교통상황에 대한 이론적이고 실제적인 배경은 연속교통류 모형(Continuum Flow Models: CFM)에서 설명될 수 있다. CFM은 도로상의 차량움직임을 한정된 통과용량을 갖는 수로의 유체의 흐름에 비유한 것이다. 이때 흐름의 주도권의 영향이 충격파를 통해 전·후로 전달되는데, 차량의 흐름도 이와 유사한 특성을 나타내는 것에 근거하여 차량의 혼잡수준에 따라 과포화를 포함한 모든 교통현상에 대한 인지적 설명이 가능하다. 실제적으로 CFM에서 차량의 흐름을 교통유량(flow), 밀도(density), 속도(speed)의 변수로 처리되어 1차원 압축류(compressible flow)로 비유된다. 이러한 CFM은 단순 CFM(Simple CFM; Lightill and Whitham, 1955; Richard, 1956)과 고차 CFM(Higher Order CFM; Payne, 1971)으로 구분되는데, 단순 CFM은 유체보존법칙(flow conservation)에 기초하고 있으며, 고차 CFM은 유체보존법칙이외에도 가속도와 관성의 효과를 고려할 수 있는 가속도방정식(Moment Equation)을 추가로 사용한다. 기존의 단순 CFM은 가·감속률 효과 및 차량간 이력현상(Hysteresis)을 극복하지 못하며 혼잡하지 않은 교통상황에 적절하다는 단점이 있다. 반면 고차 CFM은 차선별 밀도와 통행속도를 예측하게 되어 있어 복잡한 상황을 묘사할 수 있으나 수식에 이용되는 계수들을 구하는 과정들이 너무 복잡하므로 소규모 램프구간을 포함한 연속 교통류 네트워크에 한정되어 적용되고 있다. 특히, 신호교차로를 포함하는 단속 교통류의 대기행렬의 형성이나 소산에 관한 약간의 소개이외에는 모형의 적용에 대한 예가 부재하다고 볼 수 있다.

이러한 신호교차로를 포함하는 단속 교통류에 대한 CFM모형의 적용은 Daganzo(1994,1995)가 Lightill

and Wihitham(1955)과 Richard(1956)(LWR) 모형에 대해 유한차분법(Finite Difference Method)에 대한 해법을 개발하여 Cell Transmission Model(CTM)을 제안함으로써 획기적인 돌파구가 마련되었다. CTM은 고차 CFM에 비해 가·감속현상이나 Stop and Go현상 및 차로감소 등과 같은 복잡한 교통현상을 포함하는 교통류에 대한 설명력이 단순하나, 동일한 특성을 가지는 구간으로 구분되는 Cell별 용량에 의해 차량을 전이시키므로 비교적 현실적으로 용이하게 교통류를 표현할 수 있을 뿐만아니라 대규모 네트워크에도 적용하기 용이하며, 잠금현상(Lockup)의 문제도 발생하지 않는다(김주형, 1999; 손형태, 2002; 임성만, 2002). 또한 CTM의 최근 현장적용 결과 고속도로 구간의 연속 교통류 뿐만 아니라 간선도로 구간의 단속 교통류의 현상도 잘 재현하는 것으로 나타났다(Lin and Ahanotu, 1995; Smilowitz and Daganzo, 1999). 특히 신호화된 도시부 도로에 대한 적용연구(Lo, 2001)결과 다양한 교통상황에서 현장 교통류를 합리적으로 대변하는 것으로 나타났다. 종합적으로 CTM은 신호교차로로 제어되는 도시가로의 단속 교통류 재현모형으로 적합하게 활용가능하다고 판단된다.

본 연구에서는 Cell Transmission 이론을 기반으로 신호시간을 산정하는 최적화모형을 혼합정수계획법을 통해 제안한다. 제안된 모형에서 교통류의 흐름은 Cell Transmission 이론에 따라 전이되며, 교차로로 접근하는 교통류의 시간대별 특성을 고려하여 가로망의 통행시간비용을 최소화하도록 최적의 신호시간을 산정한다. 모형에서 Cell Transmission의 교통류 전이현상과 신호시간산정모들은 수학적 특성을 고려한 선형내지는 정수제약조건으로 통합된다(Bazarrá et al., 1990; Williams, 1993). 또한 모형에서 각각의 교통류는 출발과 도착지의 특성을 내재한 차량으로 간주되므로 차량은 신호교차로의 비용을 최소화하기 위해 시스템과 협력한다는 차원에서 시스템최적(Li, et al., 1999; Ziliaskopoulos, 2000)을 만족하며, 따라서 모형에서 산정된 신호시간은 시스템의 통행시간비용을 최소화하는 최적해이다(Wardrop, 1952; Sheffi, 1985).

최근까지 Cell Transmission 이론을 교통류이론으로 모형화한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. Li, et al. (1999)은 CTM을 선형제약조건(Linear Constraints)

로 통행시간 최소화를 위한 시스템최적 동적통행배정(Dynamic Traffic Assignment:DTA)을 제안했다. 모형에서 출발지의 출발시간과 도착지의 도착시간을 각각의 변수로한 별도의 식을 제안했다. Ziliaskopoulos (2000)는 단일 도착지의 갖는 네트워크의 시스템 최적 DTA 모형을 제안했다. Lo(1999a)는 CTM모형을 비선형상보문제(Nonlinear Complementarity Problem: NCP)의 제약조건으로 정식화하는 경로기반 DTA 모형을 제안했다. Lo(2001)는 CDM을 교통류 모형으로 내재한 최적신호시간모형을 혼합정수계획법(Mixed Integer Programming:MIP)을 제안했다. 본 연구에서 제안하는 모형과 Lo(2001) 연구의 가장 큰 차이점은 Lo(2001)는 CTM모형에서 경로선택에 대한 고려를 하지 않았다는 것이며, 따라서 Lo(2001)의 모형에서 개별 운전자들은 시스템 최적의 신호시간을 위해 협동하지 않으므로, 차량의 경로선택을 고려한 진정한 의미에서의 최적의 해를 제공하지 않는다는데 있다. Lo, H. and Sszeto, Y. W.(2002)는 CTM을 내재한 변동부등식문제를 통해 경로기반 DTA 모형과 해법을 개발했다. Lo, Chang, and Chan(2001)은 유전자 알고리즘을 이용하여 CTM 교통류 모델을 포함하는 동적신호제어 최적화 모델(DISCO)를 개발하여 포화교통상황의 실제 가로망에 적용하여 정제개선효과를 가져왔다.

그밖의 유사연구로서 TRANSYT-7F의 차량군확산모형(Platoon Dispersion)을 동적통행배정모형과 선형내지는 비선형계획법으로 결합하려는 동향이 있었다(Wey and Janakrishnan, 1997; Shin et al., 2001).

본 연구는 다음과 같이 진행된다. 2장에서 Cell Transmission 이론을 개관하고, 3장에서 경로선택과 신호최적화를 포함하는 시스템최적 신호시간 산정모형을 구축하며, 4장은 3장에서의 모형을 통해 고정신호현시와 최적신호현시의 두 시나리오를 구성하여 비교·평가하며, 5장에서 결론과 추후 연구과제를 제안한다.

## II. Cell Transmission 모형

Cell Transmission 모형은 유체역학 혹은 교통류에 관한 식(1)과 식(2)로 표현되는 LWR모형(Lighthill & Whiteham 1955; Richards 1956)에서 비롯된 수리적 접근이다.

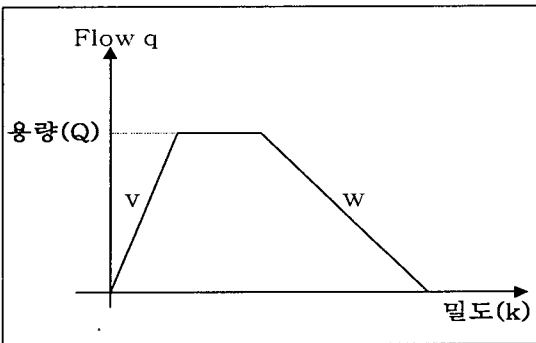
$$\frac{\partial q}{\partial d} + \frac{\partial k}{\partial t} = 0, \quad q = F(k, d, t) \quad (1)$$

여기서,

- $q$  : 교통량
- $k$  : 밀도
- $t$  : 시간
- $F$  :  $q$ 와  $k$ 의 연계함수

넓은 범위에서 적용하기 힘든 이 식이 비교적 최근에 Newell(1991, 1993)를 거쳐 Daganzo(1995)에 의해 그가 이름 붙인 CTM으로 개발되어 컴퓨터로 교통류를 비교적 용이하게 묘사할 수 있게 된 것이다. 이 CTM은 교통량과 밀도의 관계를 선형관계로 가정하여, 전이 교통량은 상류부 Cell의 진출용량과 하류부 Cell의 진입용량의 최소 값으로 결정하는 모형으로 복잡한 네트워크에 대해 모든 교통상황하에서 각각의 링크를 동일한 특성을 가지는 구간으로 구분하여 교통류의 거시적인 표현을 기초한 교통류 이론을 제시한다.

다음은 CTM에서 가정하는 용량-밀도함수의 형태이다. 이러한 관계는 저밀도 상황하에서의 자유속도  $v$ 와 고밀도 상황하에서의 후방 충격과 속도  $w$ 를 가정하고 있다.



〈그림 1〉 교통류(q)-밀도(k) 곡선

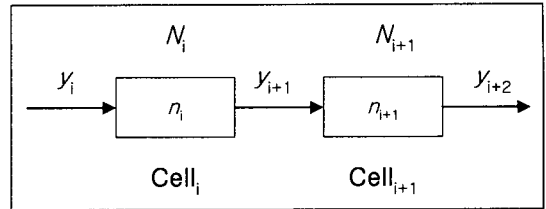
혼잡이 없다면 각 시간대에서 모든 차량은 한 cell에서 다른 cell로 이동하고 나아가 각 cell은 식(3)에 나타나는  $N_i$ 로 표현되는 용량을 갖게 된다.

$$N_i = k_{jam} \cdot m \cdot L \quad (2)$$

여기서,

- $k_{jam}$  : 최대밀도
- $m$  : 차선수
- $L$  : cell의 길이

〈그림 2〉는 CTM모형의 cell간의 기본적인 설정을 보여준다.



〈그림 2〉 두 Cell간의 교통류 전이 관계

여기서,

- $n_i$  : 각 cell i에 포함된 차량수,
- $y_i$  : cell i에 진입할 차량

$t$ 시간에 cell  $i+1$ 에 유입될 차량은 식(3)과 같이 나타낸다.

$$y_{i+1}(t) = \min \{ n_i(t), Q_{i+1}(t), \delta \cdot [N_{i+1} - n_{i+1}(t)] \} \quad (3)$$

여기서,

- $n_i(t)$  : Cell i에서 대기중인 차량수
- $Q_{i+1}(t)$  : 시간t에서 Cell  $i+1$ 에 진입가능한 최대 차량수
- $N_{i+1}(t)$  : Cell  $i+1$  최대로 수용할 수 있는 차량수
- $N_{i+1} - n_{i+1}(t)$  : Cell  $i+1$  이 수용가능한 차량수
- $\delta$  : 충격파의 속도

수요가 적을 경우에는 첫 번째 즉, 상류부의 교통량이 최소값이 되며, 수요가 큰 경우에는 하류부의 가용공간이 최소값이 되어 각각 교통량 제약으로 설정된다. 이러한 각 시간대에서의 교통류가 계산되어 지고 나면 전체 네트워크는 식(4)을 통해 다음시간대의 Cell에 대기하는 차량수가 계산된다.

$$n_i(t+1) = n_i(t) + y_i(t) - y_{i+1}(t) \quad (4)$$

### III. 시스템 최적신호시간 산정모형의 구축

Cell Transmission에 대한 부호는 이해의 편의를 돕기 위해 가능한 한 기존의 연구(Li et al,1999; Ziliaskopoulos, 2000; Lo,2001)에서 이미 적용되었던 부호에 기초해서 구성되었으며 부호의 요약은 <표 1>과 같다.

<표 1> 사용된 부호

$C, E$	모든 Cell 집합, 모든 연결 Cell 집합
$T$	이산시간간격 집합, 즉 $T = \{t, 2t, 3t, \dots,  T t\}$
$x_{r,s,i}^t$	Cell (i)내에서 시간 t동안 출발지(r), 도착지(s)인 차량수
$y_{r,s,i}^t$	Cell (i)내에서 출발지(r), 도착지(s)를 갖는 차량수 시간 t동안 Cell(i+1)로 진입하는 차량수
$N_i^t$	시간 t동안 Cell (i)에 존재할 수 있는 최대 차량수
$inQ_i^t$	시간 t동안 Cell (i)로 진입할 수 있는 최대 차량수
$outQ_i^t$	시간 t동안 Cell (i)로부터 유출될 수 있는 최대 차량수
$\Gamma^{-1}(i)$	Cell (i) 이전 Cell
$\Gamma(i)$	Cell (i) 이후 Cell
$OD_{r,s}^t$	시간 t동안 출발지(r), 도착지(s)로 향하는 수요

#### 1. 목적함수

신호제어는 여러 가지 목적으로 활용 가능하므로 목적함수는 다양한 형태는 표현될 수 있다. 예로서 지체(Delay), 통행시간(Travel Time), 정지(Stop) 또는 이들의 조합을 최소화하는 것이나, 또는 교차로의 통과 교통량을 극대화하는 것이 있다. 이러한 모든 유형의 수행지표(Performance Index)가 목적함수로 수식화가 가능하다. 본 연구에서 채택한 목적함수는 교통망에서 전체차량이 경험하는 통행시간을 최소화하는 것이다. 여기서 통행시간이란 모든 차량이 교통망에서 경험한 시간을 의미한다. 다수의 출발지와 다수의 도착지를 갖는 수요를 고려한 네트워크에서 차량이 경험한 통행시간을 최소화하는 것을 정식화하면 식(5)과 같다.

$$Z = \text{minimize} \sum_{\forall r \in C_k} \sum_{\forall s \in C_s} \sum_{t \in T} \sum_{\forall i \in C_i} x_{r,s,i}^t \quad (5)$$

식(1)은 네트워크에서 활동하는 차량을 출발지r을 시간t에 목적지s를 향해 출발한 차량을 가능한 신속하게 목적지까지 도착하게 한다는 개념으로 통행시간 최소화와 의미를 함축하고 있다. 이와 유사한 형태의 목적함수가 Li et al.(1999)와 Ziliaskopoulos(2000)에 의해 적용되었다.

#### 2. Cell Transmission 제약조건

Cell Transmission 모형에서는 시뮬레이션 시간을 작은 단위시간(Time Interval)로 이산화 된다. 이를 기초로 네트워크의 모든 링크가 동질구간(Homogeneous Segments)으로 나뉘는 데, 각각의 동질구간을 Cell 이라고 부르고 각 Cell의 길이는 1단위시간동안 자유 속도로 여행한 거리와 동일하다.

Daganzo(1994,1995)에 의하면 Cell집합은 전방(Predecessor) Cell과 후방(Successor)Cell의 수에 따라 다음과 같이 5개의 부분집합으로 다시 분리될 수 있다:

- 보통(Ordinary) Cell :  
( $C_o, |\Gamma(i)|=1, |\Gamma^{-1}(i)|=1$ )
- 분류(Diverging) Cell :  
( $C_D, |\Gamma(i)|>1, |\Gamma^{-1}(i)|=1$ )
- 합류(Merging) Cell :  
( $C_M, |\Gamma(i)|=1, |\Gamma^{-1}(i)|>1$ )
- 생성(Source) Cell :  
( $C_R, |\Gamma(i)|=1, |\Gamma^{-1}(i)|=1$ )
- 소멸(Sink) Cell :  
( $C_S, |\Gamma(i)|=1, |\Gamma^{-1}(i)|=1$ )

연결 Cell(Cell Connector) 집합도 시작Cell과 종점Cell의 형태에 따라 5개의 부분집합으로 분리된다. 보통연결 Cell : ( $E_o$ ), 분류연결 Cell : ( $E_M$ ), 합류연결 Cell : ( $E_D$ ), 생성연결 Cell : ( $E_o$ ), 소멸연결 Cell : ( $E_R$ )

분류Cell과 합류Cell 사이에 직접적인 연결이 없다고 보는 가정 때문에(Daganzo,1995)본 연구에서 분류Cell과 합류Cell사이의 연결Cell은 고려하지 않는다.

Cell Transmission 제약조건은 교통류가 네트워크를 움직이게 하는 필요한 기본수식으로 다음과 같

이 정의된다.

보통Cell, 합류Cell, 분류Cell의 교통류보전을 위한 제약조건은 식(6)과 같다.

$$x_{r,s,i}^t = x_{r,s,i}^{t-1} + \sum_{k \in \Gamma^{-1}(i)} y_{r,s,ki}^{t-1} - \sum_{j \in \Gamma(i)} y_{r,s,ij}^{t-1} \quad \forall i \in C / (C_R), r \in C_R, s \in C_S, \forall t \in T \quad (6)$$

소멸Cell은 무한대의 용량 ( $N_i^t = \infty, \forall i \in C_S, \forall t \in T$ )을 보유하고 교통량이 무한대로 진입 ( $Q_i^t = \infty, \forall i \in C_S, \forall t \in T$ )가능하므로 차량의 존재에 제약을 받지 않는다. 생성Cell은 무한대의 용량 ( $N_i^t = \infty, \forall i \in C_R, \forall t \in T$ )과 교통량이 무한대로 유출 ( $Q_i^t = \infty, \forall i \in C_S, \forall t \in T$ )가능하다.

모든 연결Cell의 제약조건은 식(7)~(10)과 같다. 이 제약조건들은 두 Cell사이의 차량이 전방Cell에서는 여유교통용량(Remaining Capacity), 후방Cell에서는 현재의 교통량, Cell간의 경계에서는 입력 및 출력 통과용량에 의해 한정되도록 하려는 것이다.

$$\sum_{j \in \Gamma(i)} y_{r,s,ij}^t \leq x_{r,s,i}^t \quad \forall i \in C, \forall r \in C_R, \forall s \in C_S, \forall t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{r \in C_R} \sum_{s \in C_S} \left( \sum_{k \in \Gamma^{-1}(i)} y_{r,s,ik}^t + x_{r,s,i}^t \right) \leq N_i^t \quad \forall j \in C \setminus \{C_S, C_R\}, \forall t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{r \in C_R} \sum_{s \in C_S} \left( \sum_{k \in \Gamma^{-1}(i)} y_{r,s,ik}^t \right) \leq out Q_i^t \quad \forall j \in C \setminus C_S, \forall t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{r \in C_R} \sum_{s \in C_S} \left( \sum_{k \in \Gamma(i)} y_{r,s,ik}^t \right) \leq in Q_j^t \quad \forall j \in C \setminus C_R, \forall t \in T \quad (10)$$

출발시간을 전제로 출발지에서 수요를 네트워크에 확산시키기 위한 제약조건은 식(10)과 같이 차량을 강제로 생성Cell에다 넣어주는 방법이다. 만약 식(6)이 제약조건으로 존재하지 않으면, 네트워크의 총 여행시간을 최소화하기 위해서는 최적의 방법은 차량을 네트워크로 진출시키지 않는 것이므로 생성Cell에서 차량이 억제되어(vehicle holding) 항상 목적함수 값이 영이 된다.

$$x_{r,s,r}^t = x_{r,s,r}^{t-1} + OD_{r,s}^{t-1} - \sum_{j \in \Gamma(i)} y_{r,s,ij}^{t-1} \quad \forall j \in \Gamma(r), \forall r \in C_R, \forall t \in T \quad (11)$$

### 3. 신호운영 제약조건

Lo(2001)은 녹색시간동안 접근로의 회전을 허락하지 않는 신호교차로에 대한 수식을 제시했으나, 본장에서 차량의 경로선택을 고려할 수 있도록 녹색시간동안 전 방향으로 회전이 가능한 제약조건을 제시한다. 수식의 도출을 위한 그림과 기호는 가능한 한 Lo(2001)에서 이용된 그림과 기호를 적용하도록 한다.

문제의 유형을 단순화시키기 위해 신호교차로는 전 방향 회전이 가능한 2현시로 운영되고 주기(Cycle)가 고정되어 있다고 가정하면, 신호교차로를 운영하기 위해서는 주기 내에는 오프셋(Offset)과 녹색시간(Green Time)의 2가지 결정변수(Decision Variable)가 존재한다. 참고로, 교차로간의 오프셋은 각 교차로의 주방향 최적녹색시간의 시작시간이므로 경로선택을 포함한 신호시간의 최적해를 제공하는 과정에서 용이하게 구할 수 있다.

신호교차로내의 오프셋의 정의는 모형시간(Horizon)의 시작시간부터 주도로에 최초의 녹색시간이 개시되는 시간으로 주도로에는 적색시간으로 부도로는 녹색시간으로 초기화된다. 고정된 주기에서 녹색시간이 도출되면 적색시간은 결정된다. 따라서 오프셋과 녹색시간이 해법에서 발견하고자 하는 최종적인 결정변수라고 할 수 있다. 오프셋과 적색시간은 최소 및 최대 제약에 의해 한정된다면 다음과 같다.

$$R_{min} \leq \theta_a \leq R_{max} \quad (12)$$

$$G_{min} \leq g_a(l) \leq G_{max} \quad (13)$$

여기서,

- $\theta_a$  : 교차같은 값으로 로 a에서 주도로의 오프셋
- $R_{max}, R_{min}$  : 각각 최대 및 최소적색시간
- $G_{min}, G_{max}$  : 각각 최대 및 최소 녹색시간
- $g_a(l)$  : 교차로 a에서 주기 l동안 주도로의 녹색시간  $g_a(l)$ 을 초기화하는 경우 고정식 신호제어로 정의된다.

결정변수  $\theta_a, g_a(l)$ 를 도출하기 위해서는 교차로의

현시1: 주도로

	주기1	주기2	주기3	주기4
오행색	청색	적색	청색	적색
	청색	적색	청색	적색

현시2: 부도로

오행색	적색	청색	적색	청색	적색	청색	적색	청색
-----	----	----	----	----	----	----	----	----

〈그림 3〉 신호교차로의 현시체계의 구성

녹색이나 적색시간동안 교통류의 멈춤과 주행(Stop and Go)흐름과 연관시켜야 한다.  $Q_{ie}(t)$ 를 신호등에 인접된 링크의 마지막 Cell의 유출용량(Exit Capacity)이라고 정의하면, 신호등이 녹색일 때 유출용량은 포화교통류율(Saturation Flow)이며, 적색이면 영이다.

〈그림 3〉은 교차로의 현시구성 체계를 연속된 주기번호로 나타낸 것이다. 신호현시가 유출용량과 관련된 방법을 나타내기 위해 주기 $l$ 과 주기내의 청색 현시의 경우를 고려한다.  $p$ 를 주기순서라고 가정하면 〈그림 3〉에서 나타나듯이 주 방향의 주기내 청색현시를 고려한다.

교차로  $a$ 에서  $m, n$ 을 각각 주도로와 부도로의 신호등에 의해 운영되는 링크라고 정의하면, 신호등에 의해 운영되는 주도로의 Cell은 Cell( $m, e$ ), 부도로는 Cell( $n, e$ )이다. 오행색  $\theta_a$ 와 녹색현시  $g_a(l)$ 를 결정 변수로 정하고, 현시  $p$ 의 시작과 종점시간을  $S_a(p)$ 와  $E_a(p)$ ,  $l$ 을  $p$ 현시를 포함하는 주기라고 정의하면 다음과 같다.

$$S_a(p) = \theta_a + (l-1)C \tag{14}$$

$$E_a(p) = S_a(p) + g_a(l) \tag{15}$$

현시  $p$ 에 대해 Cell( $m, e$ )와 Cell( $n, e$ )의 유출용량은 식(16)~식(17)에 의해 결정된다.

$$\text{if } (S_a(p) < t \leq E_a(p)), \tag{16}$$

$$\text{then } \begin{cases} out Q_{me}^t = s \\ out Q_{ne}^t = 0 \end{cases}$$

$$\text{else } \begin{cases} out Q_{me}^t = 0 \\ out Q_{ne}^t = s \end{cases} \tag{17}$$

if-then-else 조건은 선형조건(Linear Constraints)이 아니기 때문에 일반 수리계획법(Mathematical Programming)에서 직접 정식화될 수 없다. 이 경우는 Big-M 방법을 응용하여 이진변수를 도입함으로써 식을 변화할 도모해야 한다. 추가된 3 이진변수  $y_1(p, t), y_2(p, t), z(t)$ 를 이용하여 식(16)~식(17)을 선형제약조건으로 다시 정식화하면 다음과 같다:

$$-Big M \cdot y_1(p, t) + \xi \leq t - E_a(p) \tag{18}$$

$$t - E_a(p) \leq Big M \cdot (1 - y_1(p, t)) \tag{19}$$

$$-Big M \cdot y_2(p, t) \leq S_a(p, t) \tag{20}$$

$$S_a(p, t) \leq Big M \cdot (1 - y_2(p, t)) - \xi \tag{21}$$

$$y_1(p, t) + y_2(p, t) - z(t) \leq 1 \tag{22}$$

$$z(t) \leq y_1(p, t) \tag{23}$$

$$z(t) \leq y_2(p, t) \tag{24}$$

$$out Q_{me}^t = z(t) \cdot s \tag{25}$$

$$out Q_{ne}^t = (1 - z(t)) \cdot s \tag{26}$$

여기서,  
 $Big M$  : 매우 큰 상수  
 $\xi$  : 매우 작은 상수

위에서 변수  $y_1(p, t)$ 는  $t \leq E_a(p)$ 가 만족여부를 규명하고,  $y_2(p, t)$ 는  $t > S_a(p)$ 가 만족여부를 확인하며,  $z(t)$ 는  $y_1(p, t)$ 와  $y_2(p, t)$ 값에 따라 현시방향별로 유출용량을 배정하는 역할을 담당하는데 식(23)~식(24)에 의해서  $y_1(p, t)$ 과  $y_2(p, t)$ 의 값이 각각 1일 경우에만  $z(t)$ 는 1이 된다.

따라서 위의 수식을 정리할 때 본 연구에서 제안하는 시스템최적 신호시간 산정모형은 목적함수(5)와 그에 수반된 Cell Transmission 제약조건인 (6-11)과 신호운영제약조건인 식(12)~식(15)와 식(18)~식(26)으로 구성된다.

### IV. 실험계획

#### 1. 자료구축

간단한 네트워크의 구축을 통해 본 연구에서 제안된 시스템 신호최적화 모형이 교통상황에 따라 효과를 증진할 수 있음을 확인한다. 두 가지 준비된 실험계획은 1)고정식 신호등 2)개발된 신호최적화 모형의 효과를 통행시간측면에서 측정하는 것이다. 연구를 위해 도입된 네트워크는 그림과 같고 사례연구에서 적용된 파라메타는 다음과 같다.

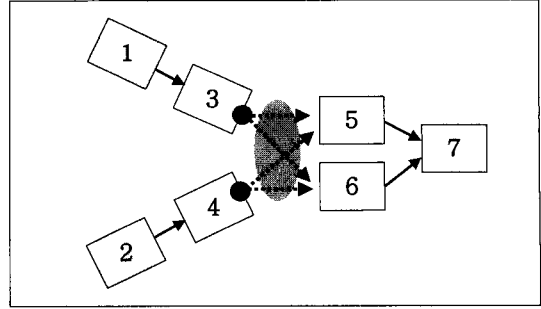
- 모든 링크는 1차선
- 7 Cell중 4개의 보통Cell, 2개의 생성Cell, 1개의 소멸Cell
- 단일 신호교차로로 구성되며, 주접근로는 Cell 3과 부접근로는 Cell 4
- 자유여행속도 : 50km/h
- 단위시간간격(k) : 10(secs)
- 포화밀도(Jam Density) : 10vehs/Cell
- 최적밀도(Optimum Density) : 36vehs/km (5vehs/ Cell)
- 최대용량 : 1800vehs/hr (5vehs/k)
- 주기 : 40secs (4\*k)
- 시뮬레이션 기간 : 60\*k
- 적용된 주기수 : 15

제안된 모형의 효과측정을 위해 두 가지 시나리오를 구성하며, 각 시나리오의 포함된 조건은 다음과 같다.

- ◇ 시나리오 1 : 고정식신호 + 경로선택
  - 최소녹색시간 : (20secs) 2\*k
  - 최대녹색시간 : (20secs) 2\*k
- ◇ 시나리오 2 : 신호최적화 + 경로선택
  - 최소녹색시간 : (10secs) 1\*k
  - 최대녹색시간 : (30secs) 3\*k

고려된 수요는 다음과 같다.

- ◇ 단위시간1에 20대의 차량이 출발지 Cell 1에서 도착지 Cell 7로 진행



〈그림 4〉 적용네트워크

- ◇ 단위시간1에 10대의 차량이 출발지 Cell 2에서 도착지 Cell 7로 진행

적용된 네트워크는 총 통행비용을 줄이기 위한 신호제어와 경로선택의 효과를 용이하게 파악하기 위해 〈그림 3〉와 같이 2출발지 Cell과 1도착지 Cell을 갖는 총7 Cell로 구성되어 있다. Cell3과 4는 각각 신호교차로를 중심으로 주도로 및 부도로의 접근로를 의미하며 이때 신호교차로를 병목구간으로 혼잡의 진행을 확인하기 위해 녹색신호시간시 최대 유출 교통유율은 Cell3은 1.5(vehs/k), Cell4는 2.5(vehs/k)로 제한하였다. 본 연구에서 제안한 혼합정수계획법으로 구성된 목적함수와 일련의 제약조건에 대한 최적해를 구하기 위해 GAMS 소프트웨어의 Cplex모듈을 이용하였다(Brooke et al, 1998).

#### 2. 결과분석

본 연구에서 운전자의 경로선정 및 신호시간제한 조건을 고려하여 목적함수를 최적해를 찾는 것은 네트워크의 기점을 출발한 차량을 각 Cell의 용량과 신호시간을 고려하여 가능한 한 모든 차량을 신속하게 종점까지 도달하게 하는 것으로 전체 교통시스템의 최적사용을 유도하는 의미를 포함하고 있다. 결과에서 이를 확인하는 지표로서 목적함수 값과 차량이 네트워크에서 전체차량이 소거되는 시점까지 운영된 신호주기의 수로 파악될 수 있다. 〈표 2〉는 두 시나리오의 목적함수 값과 운영된 신호주기의 수를 보여준다. 시나리오1에서 고정신호운영을 할 경우 최대 8주기까지 신호운영이 요구되며 전체 시간주기동안 네트워크를 주행하는 차량수는 372.5대이며, 시나리오2에서 최적신호로 운영될 경우 6주기동안 334.5대가



〈표 2〉 차량 네트워크 소거 평가지수

시나리오	목적함수 값(차량대수)	신호운영 주기수
1	372.5	8
2	334.5	6

네트워크에 존재하여 목적함수 값으로 비교하여 약 10.2%의 네트워크의 비용감소를 가져왔다. 두 시나리오에서 도출된 지표의 수치는 신호전략과 경로선택의 최적조합을 통해 시스템의 효율성을 증가시킨다는 정의를 만족함을 입증시킨다. 〈그림 5〉는 시나리오별로 사용된 신호현시의 운영을 보여준다.

시나리오1은 고정신호 운영상황하에서 운전자의 경로선택을 통해서만 네트워크의 비용을 줄이는 반면, 시나리오2는 신호운영과 경로선택을 다 적용했을 때 보다 효율적으로 네트워크의 비용을 감소시킬 수 있음을 보여준다. 시나리오2의 현시운영에서 Cell 3의 병목구간으로 발생하는 주도로 방향의 교통혼잡을 고려해서 청색신호시간을 최대현시시간(3k)까지 확대하여 주도로 방향에 대해 우선권(right of way)을 더욱 많이 부여한다.

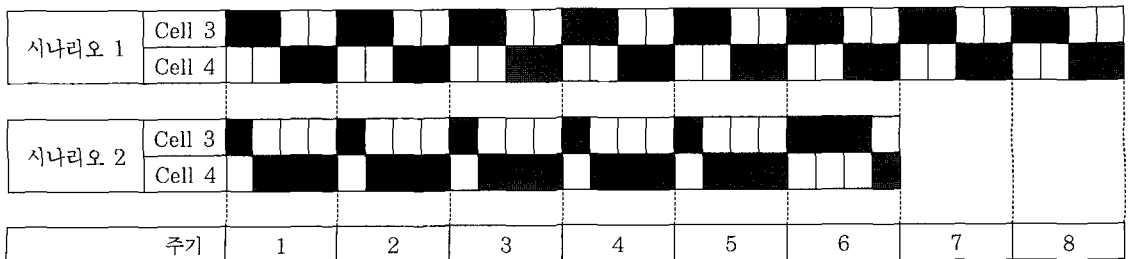
차량의 경로선택 과정은 각 Cell에서 다음 Cell로 통과한 교통량의 특성을 파악해 보면 알 수 있다. 본 연구에서 특히 신호교차로로 운영되는 Cell 3과 4에서 차량이 분산되면 도착지 Cell 7까지 2개의 경로만이 존재하므로, Cell 3과 4에서 Cell 5와 6으로 분산된 교통량은 각각 2개의 다른 경로를 선택한 차량으로 간주될 수 있다.

〈표 3〉~〈표 4〉와 〈표 5〉~〈표 6〉은 각각 시나리오 1과 2에서 최적으로 구해진 Cell간 통과교통량을 나타낸다.

고정현시로 운영되는 시나리오 1에서는 최적신호로 운영되는 시나리오2에 비해서 신호교차로의 주 방향인 Cell 3의 유출용량(1.5)의 제약을 받으나 상대

적으로 적은 녹색시간(2\*k)을 할당하므로 Cell 1과 3에 넓은 시간대에 교통량이 존재한다. 그러나, 최적현시로 운영되는 시나리오 2의 경우 주 방향인 Cell 3에 최대 청색현시시간(3\*k)이 할당되어 교통량을 보다 신속하게 신호교차로를 통과하게 한다. 반면에 시나리오 1의 부 접근방향의 경우 최소 청색시간(1\*k)이 할당되므로 시나리오2에서 할당된 청색시간(2\*k)과 비교할 때 부 방향의 교통량은 네트워크에 보다 오랜 기간 존재하게 된다. 그러나, 채택된 두 시나리오를 경로선택과 신호운영의 양 측면에서 전체적으로 평가하면, 최적현시로 운영되는 신호교차로가 고정현시로 운영되는 경우보다 차량의 경로선택을 고려한 접근 교통의 특성에 유동적으로 반응하여 신호시간을 신속적으로 운영함으로써 네트워크의 효율성을 보다 증가시키는 것으로 나타난다.

〈표 7〉~〈표 8〉와 〈표 9〉~〈표 10〉은 각각 시나리오 1과 2의 경우에서 구해진 각 Cell의 교통량을 나타내는 것으로 전 시간대의 Cell간 통과교통량과 Cell의 교통량을 식(4)의 교통류 보전에 의해 매 시간대마다 갱신된다. Cell의 교통량 결과는 Cell간 통과교통량 결과에서 예시된 것과 유사하다. 시나리오 1의 교통량은 Cell 3으로부터 정체형성 때문에 8주기에 걸쳐서 주도로 방향에 분산되어 있으나, 부 도로방향의 차량은 충분한 청색시간 할당(2\*k)으로 초기 3주기 동안 네트워크를 빠져나간다. 반면, 시나리오2는 부 도로방향에 할당되는 시간을 최소녹색시간(1\*k)으로 제한하여 혼잡구간으로 보다 많은 녹색시간(3\*k)을 할당함으로써 6주기 만에 전체 교통류를 네트워크에서 소거시켰다. 이는 교통혼잡을 전체 네트워크상에 균등하게 분포시킴으로 전체 교통 시스템의 개선효과를 가져올 수 있다는 시스템 최적의 정의를 다시 한번 확인하는 결과로 볼 수 있다.



〈그림 5〉 시나리오별 신호교차로의 신호현시 운영

〈표 3〉 시나리오1의 주도로 방향 Cell 간 통과교통량  
( $y'_{r,s,\bar{y}}$ ,  $r=1$ ,  $s=7$ )

t	(Cell i → j)				
	(1·3)	(3·5)	(3·6)	(5·7)	(6·7)
1	5.0				
3	5.0	1.5			
4			1.5	1.5	
7		1.5			
8			1.5	1.5	
11	4.5		1.5		
12			1.5		1.5
15		1.5			
16		1.5		1.5	
19	5.0	1.5			
20		1.5		1.5	
23		1.5			
24		1.5		1.5	
27	0.5	1.5			
28		0.5		1.5	
31				0.5	
32					

〈표 4〉 시나리오1의 부도로 방향 Cell 간 통과교통량  
( $y'_{r,s,\bar{y}}$ ,  $r=2$ ,  $s=7$ )

t	(Cell i → j)				
	(2·4)	(4·5)	(4·6)	(5·7)	(6·7)
1					
2	5.0				
5	5.0	2.5			
6		2.5		2.5	
9		2.5		2.5	
10		2.5		2.5	
13					
14					
17					
18					
21					
22					
25					
26					
29					
30					

〈표 5〉 시나리오2의 주도로 방향 Cell 간 통과교통량  
( $y'_{r,s,\bar{y}}$ ,  $r=1$ ,  $s=7$ )

t	(Cell i → j)				
	(1·3)	(3·5)	(3·6)	(5·7)	(6·7)
2	1.5				
3	5.0		1.5		
4	5.0	1.5			1.5
6		1.5		1.5	
7		1.5		1.5	
8		1.5		1.5	
10		1.5			
11	5.0		1.5	1.5	
12			1.5		1.5
14			1.5		
15			1.5		1.5
16			1.5		1.5
18	3.5				1.5
18		1.5			
19		1.5		1.5	
20		0.5		1.5	
24				0.5	

〈표 6〉 시나리오2의 부도로 방향 Cell 간 통과교통량  
( $y'_{r,s,\bar{y}}$ ,  $r=2$ ,  $s=7$ )

t	(Cell i → j)				
	(2·4)	(4·5)	(4·6)	(5·7)	(6·7)
1					
5	5.0	2.5			
5	5.0	2.5		2.5	
9		2.5		2.5	
13		2.5		2.5	
17		2.5		2.5	
21					
22					
23					

〈표 7〉 시나리오1의 주도로 방향 Cell 교통량  
 ( $x_{r,s,i}^t, r=1, s=7$ )

t	Cell j			
	1	2	5	6
	20.0			
3	15.0	5.0		
4	10.0	8.5	1.5	
	10.0	7.0		1.5
	10.0	7.0		
7	10.0	7.0		
8	10.0	5.5	1.5	
	10.0	4.0		1.5
	10.0	4.0		
11	10.0	4.0		
12	5.5	7.0		1.5
	5.5	5.5		1.5
	5.5	5.5		
15	5.5	5.5		
16	5.5	4.0	1.5	
	5.5	2.5	1.5	
	5.5	2.5		
19	5.5	2.5		
20	0.5	6.0	1.5	
	0.5	4.5	1.5	
	0.5	4.5		
23	0.5	4.5		
24	0.5	3.0	1.5	
	0.5	1.5	1.5	
	0.5	1.5		
27	0.5	1.5		
28		0.5	1.5	
			0.5	
31				
32				

〈표 8〉 시나리오1의 부도로 방향 Cell 교통량  
 ( $x_{r,s,i}^t, r=2, s=7$ )

t	Cell j			
	2	4	5	6
1				
2	10.0			
	10.0			
	10.0			
5	5.0	5.0		
6		7.5	2.5	
		5.0	2.5	
		5.0		
9		5.0		
10		2.5	2.5	
			2.5	
13				
14				
17				
18				
21				
22				
25				
26				
29				
30				

〈표 9〉 시나리오2의 주도로 방향 Cell 교통량  
 ( $x_{r,s,i}^t, r=1, s=7$ )

t	Cell j			
	1	3	5	6
	20.0			
3	18.5	1.5		
4	13.5	5.0		1.5
	8.5	8.5	1.5	
6	8.5	8.5		
7	8.5	7.0	1.5	
8	8.5	5.5	1.5	
	8.5	4.0	1.5	
10	8.5	4.0		
11	8.5	2.5	1.5	
12	3.5	6.0		1.5
	3.5	4.5		1.5
14	3.5	4.5		
15	3.5	3.0		1.5
16	3.5	1.5		1.5
	3.5			1.5
18		3.5		
19		2.0	1.5	
20		0.5	1.5	
			0.5	
24				

〈표 10〉 시나리오2의 부도로 방향 Cell 교통량  
 ( $x_{r,s,i}^t, r=2, s=7$ )

t	Cell j			
	2	4	5	6
1				
	10.0			
	10.0			
	10.0			
5	5.0	5.0		
		7.5	2.5	
		7.5		
		7.5		
9		7.5		
		5.0	2.5	
		5.0		
13		5.0		
		2.5	2.5	
		2.5		
17		2.5		
			2.5	
21				
22				
23				

그러나, 위의 결과에서 주목할 점은 전방 Cell의 여유용량이 존재함에도 불구하고 일부차량이 후방 Cell에서 다음 Cell로 전진하지 않는 차량억제현상(vehicle holding)이 발생한다는 것이다. 본 연구에서 설정한 포화밀도는 10veh/Cell 이나 결과에서 확인되듯이 정체가 형성되는 Cell 3에서 최대 8.5대만이 수용되어 여유용량 1.5대는 Cell 1에서 대기하고 있다. 이는 전방에서 진행되는 혼잡을 미리 파악하여 현재 Cell에서 차량의 대기현상으로, 전방에 존재하는 병목구간의 통과용량을 고려하여 지체를 경험하지 않는다는 측면에서 이론적으로는 합리적이나 현실적으로는 불합리하다. 그러나 이 현상은 목적함수 값에는 영향을 미치지 않으며 결과가 본 연구에서 가정한 시스템최적을 이룩하기 위한 경로선정과 신호운영의 두 측면에서 파악된 것이므로 본 연구의 결과로는 문제가 없다고 본다. 차량대기현상을 문제를 극복하여 시뮬레이션 기능을 강화하기 위해서는 이진변수를 도입한 식(27)의 간단한 추가적인 보완이 필요하다.

$$f(\cdot) = \min\{\phi(\cdot), h(\cdot)\}$$

그리고

$$\phi(\cdot) = \min\{n(\cdot), outQ_j^i\}$$

$$\forall j \in C(j) \quad (27)$$

$$\text{이 경우 } f(\cdot) = \sum_r \sum_s \sum_j y_{r,s,j}^t$$

$$n(\cdot) = \sum_r \sum_s \sum_i x_{r,s,i}^t$$

$$h(\cdot) = N_j^t - n_j^t$$

## V. 결론

Cell Transmission 이론은 기존에 응용되어왔던 신호최적화 및 교통류 시뮬레이션 모형에서 재현되는 저포화 교통상황 뿐만 아니라 충격파(shock wave), 대기행렬(queue), 대기행렬의 역류(Spillback)과 같이 교통류의 파포화 현상까지 재현하는데 적절한 이론적이고 실제적인 환경을 가능하게 한다. 본 연구에서 Cell Transmission 이론을 교통류 모형으로 활용하는 기존의 동적통행배정모형과 신호최적화모형을 통합하여 신호교차로로 구성된 네트워크의 최적 신호시간과 경로를 산정을 모형을 제안하였다. 재현된 모

형에서 네트워크의 시스템 비용을 최소화하기 위해 출발지의 수요차량은 종점에 도착할 때까지 경로선정을 통해서, 그리고 신호시스템은 차량의 교차로 접근 교통의 특성을 고려하여 신호시간 요소를 최적화하여 네트워크의 비용을 최소화하기 위해 서로 협력한다는 의미에서 시스템 최적화를 만족하도록 구성되었다. 모형은 혼합정수계획법을 통해 네트워크의 통행시간을 최소화하는 목적함수와 차량의 경로선택과 신호시간산정의 제약조건으로 정식화되었다. 최적신호전략과 고정신호전략간의 실험계획을 통한 구축된 모형의 비교·평가결과 모형의 합리성과 현장응용의 가능성 입증되었다.

추후연구과제로서 1)시물레이션 기능의 강화를 위한 Cell간 차량억제현상의 해소, 2)다현시 순서의 최적화 제약조건의 포함, 3)회전제약(Turn Prohibition 및 Penalty) 기능의 추가, 4)출발시간과 도착시간의 제약을 통한 탈출모형(Evacuation Model), 5)출발/도착 시간선택 모델(Departure/Arrival Time Choice Model), 6)모델의 현장적용을 통한 응용이 고려될 수 있다.

## 참고문헌

1. 김주영(1999), "Cell Transmission 이론을 이용한 동적통행기법 개발에 관한 연구", 서울시립대학교 석사학위논문.
2. 손영태·양충현·박우신(2002), "Moment Equation을 이용한 차로감소구간 교통류의 Higher-Order Continuum 모형 개발", 대한교통학회지, 제20권 제2호, 대한교통학회, pp.93~104.
3. 임성만·김대호·김영찬(2002), "연속교통류 재현을 위한 거시적 모형의 비교연구", 대한교통학회지, 제20권 제3호, 대한교통학회, pp.69~82.
4. Bazzara, M. S., Jarvis, J. J., and Sherali, H. D.(1990) Linear Programming and Network Flows, Johns Wiley and Sons.
5. Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., and Raman, R.(1998), "GAMS A USER'S GUIDE".
6. Daganzo, C. F.(1994) The Cell-Transmission Model: A Simple Dynamic Representation of Highway Traffic, Transportation Research

- 28B(4), pp.269~287.
7. Daganzo, C. F.(1995) The Cell-Transmission Model, Part II: Network Traffic, Transportation Research, 29B(2), pp.79~93.
  8. FHWA(1989) TRAF-NETSIM USER'S MANUAL.
  9. Gartner, N., Assmann, S., Lasaga, F., and Hou, D.(1991) A Multi-Band Approach to Arterial Traffic Signal Optimization, Transportation Research, 25B, pp.55~74.
  10. Lighthill, M.J. and Whitham, J. B.(1955) On Kinematic Waves. I. Flow Movement in Long Rivers. II. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads. Proceedings Royal Society A229, pp.281~345.
  11. Li, Y. and Ziliaskopoulos, K. and Waller, S. T.(1999) Linear Programming Formulations for System Optimum Dynamic Traffic Assignment with Arrival Time Based and Departure Time Based Demands, Transportation Research Record, 1667, pp.52~59.
  12. Lin, W. H. and Ahanotu, D.(1995) Validating the Basic Cell Transmission Model on A Single Freeway Link. Technical Note, UCB-ITS-PATH-TN-95-3, University of California, Berkeley, CA.
  13. Little, J., Kelson, M., and Gartner, N. (1981) MAXBAND: A Program for Setting Signals on Arteries and Triangular Networks, Transportation Research Record, 795, pp. 40~46.
  14. Lo, H.(2001) A Cell-Based Traffic Control Formulation Strategies and Benefits of Dynamic Timing Plans, Transportation Science, Vol.35, No.2, pp.148~164.
  15. Lo, H., Chang, E., and Chan, Y. C. (2001) Dynamic Network Traffic Control, Transportation Research A, 35(8), pp.721~744.
  16. Lo, H. and Sszeto, Y. W.(2002) A Cell-based Variational Inequality Formulation of the Dynamic User Optimal Assignment Problem. Transportation Research B, 36, pp.421~443.
  17. Payne H. J.(1971) Models of Freeway Traffic and Control, Simulation Councils Proceedings, Vol.1, No.1, pp.51~61.
  18. Richards, P. I.(1956) Shockwaves on the Highway. Operations Research 4, pp.42~51.
  19. Sheffi, Y.(1985) Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
  20. Shin, S., Ran, B., He, R. and Choi, K. (2001) Introducing Platoon Dispersion into An Analytical Dynamic Assignment Process, TRR 1773, pp.96~104.
  21. Smilowitz, K. R. and Daganzo, C. F. (1999) Predictability of Time-Dependent Traffic Backups and Other Reproducible Traits in Experimental Highway Data. Working Paper UCB-ITS-PWP-99-5, California PATH Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, CA.
  22. Texas Transportation Institute(TTI)(1991) PASSER II-90 Microcomputer User's Guide. Texas A&M University, College Station, TX.
  23. Wey, W. and Janakrishnan, R.(1997) A Network Traffic Signal Optimization Formulation with Embedded Platoon Dispersion Simulation, Transportation Research Board Annual Meeting Paper #971337.
  24. Wallace C., Courage, K, Hadi, A., and Gan, A.C(1998) TRANSYT-7F User's Guide. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Washington, DC.
  25. Williams, H. P.(1993) Model Building in Mathematical Programming, A Wiley In-

- terscience Publication, Jonh Wiley & Sons.
26. Wordrop, J.(1952) Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Part II, pp.325~378.
27. Ziliaskopoulos, A.(2000) A Linear Programming Model for the Single Destination System Optimum Dynamic Traffic Assignment Problem, Transportation Science, Vol.34, No.1, pp.37~49.

♣ 주 작 성 자 : 이광훈

♣ 논문투고일 : 2002. 8. 20

논문심사일 : 2002. 9. 3 (1차)

2002. 9. 27 (2차)

심사판정일 : 2002. 9. 27

♣ 반론접수기간 : 2003. 2. 28