

■ 論 文 ■

# Cell Transmission 이론을 이용한 동적통행배정기법 개발에 관한 연구

The Development of A Dynamic Traffic Assignment Technique using the Cell Transmission Theory

**김 주 영**

(서울시정개발연구원 연구원)

**이 승 재**

(서울시립대학교 교통공학과 조교수)

**손 의 영**

(서울시립대학교 교통공학과 조교수)

## 목 차

- I. 서론
  - II. 기존연구 검토
    - 1. Continuum Model
    - 2. Cell Transmission Theory
  - III. 모형의 구축
    - 1. 동적 O-D 발생 모듈
    - 2. 수단선택 모듈
    - 3. 교통류 진행 모듈
  - 4. 대기시간 결정 및 링크비용함수 모듈
  - 5. 최단경로 탐색 모듈
  - IV. 모형의 분석 및 검증
    - 1. 적용 네트워크
    - 2. 분석결과
  - V. 결론 및 향후과제
- 참고문헌

## 요 약

본 연구의 목적은 기존 동적통행배정모형의 접근 기법과는 달리 교통류이론을 이용하여 동적분석모형을 구축하고, 이 모형에 적합한 동적통행배정기법을 개발하는 것이다. 본 연구에서는 기존 동적교통류 모델 중 동적통행배정에 가장 적합하다고 판단되는 Daganzo의 cell transmission theory를 이용하여 동적분석모형을 구축하였으며, 동적통행배정기법인 분류부분할모델, 비용갱신모델, 링크비용함수모듈을 새롭게 개발하였다. 또한 Daganzo가 명확하게 제시하지 않은 최대대기시간 결정 알고리즘을 제시하였다.

본 연구에서 구축한 모형을 가상의 네트워크에 적용한 결과 병목구간분석, HOV차로 효과분석등은 교통특성을 현실적으로 반영하고 있다. 통행배정결과는 수학적 기법을 적용한 동적통행배정모형과 같이 완전한 균형(equilibrium)상태의 해를 보여주지 못하지만, 노선별 평균통행시간이 시간대별로 비슷하게 유지해나가는 결과를 보이고 있다.

본 모형은 고속도로 합류부 및 분류부의 교통특성분석, HOV 효과분석, TCS 및 램프미터링과 접목하여 고속도로 운영에 이용될 수 있으리라 판단된다.

## I. 서론

기존에 연구되었던 동적통행배정모형은 대부분 링크비용함수를 이용하여 균형을 찾아내는 수학적 기법에 의존하였다. 그러나 수학적 모형은 교통류 특성을 현실적으로 반영하지 못하며, convex 형태의 비용함수는 용량 이상의 교통상황에서 과대추정되는 결과를 보여주었다. 이러한 단점을 극복하기 위해 본 연구에서는 동적교통류 이론을 이용하여 동적통행배정모형을 개발하고자 한다.

본 연구의 목적은 기존 교통류 이론인 Daganzo의 Cell Transmission Theory<sup>1)</sup>(1994) 및 Special Lane Theory<sup>2)</sup>(1996)를 이용하여 동적분석모형을 구축하고, 이 모형에 적합한 동적통행배정기법을 개발하는 것이다. 기존에 Daganzo는 각 링크를 동일한 특성을 가지는 셀로 구분하여 시간대별 전이용량에 의해 차량을 진행시키는 Cell Transmission 이론을 제시하였는데, 분류부셀에서의 차량배분은 일정한 비율에 따라 차량을 배분하는 기법을 적용하였다. 그러나, 본 연구에서는 Cell Transmission 이론을 이용하여, 분류부셀에서 매 시간대별 최단경로를 탐색하여 차량을 배분하는 분류부분할모형을 개발하고, 수단별 링크비용함수 및 비용갱신모형, 최대대기시간 결정 알고리즘을 새롭게 제시하였다. 본 연구에서 구축한 동적분석모형은 고속도로 합류부 및 분류부 교통특성분석, HOV 효과분석에 이용될 수 있으며, 현실적인 링크통행비용을 산정할 수 있다.

본 연구는 II장에서 기존 동적교통류이론을 고찰하여 동적통행배정에 적합한 교통류 이론을 선정하고, 3장에서는 선정된 교통류이론을 이용하여 동적분석모형을 구축하며, IV장 및 V장에서는 가상의 네트워크에 적용하여 도출된 결과분석 및 향후과제에 대해 언급한다.

## II. 기존 동적교통류이론 고찰

### 1. 연속류 모델(Continuum Models)

연속류 모델은 이전시간대의 상류부와 하류부 구간의 밀도를 이용하여 현 시간대, 현 구간의 밀도를 구

한 다음 교통량, 밀도, 속도의 관계식  $q = uk$ 를 이용하여 속도 및 교통량을 구하는 모델이며, Simple Continuum Model 과 High Order Model이 있다. Simple continuum Model은 쉽게 교통류를 구현할 수 있는 반면, 차량의 가·감속을 효과 및 차량간의 이력현상을 고려하지 못하며, 용량이하의 교통상태에 적절하다는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 Moment Equation 및 점성이론을 적용한 High Order Model이 제시되었다. High Order 모델은 각 차로별로 모멘트를 부여하여 차로변경의 복잡한 상황을 명확히 묘사할 수 있으며, 합류부 및 위빙구간, 분류부 등에 대해서도 분석할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 모델에 이용되는 파라메타를 구하는 과정이 너무 복잡하여 큰 네트워크의 동적통행배정모형에 이용되기에는 적절하지 않다고 판단된다.

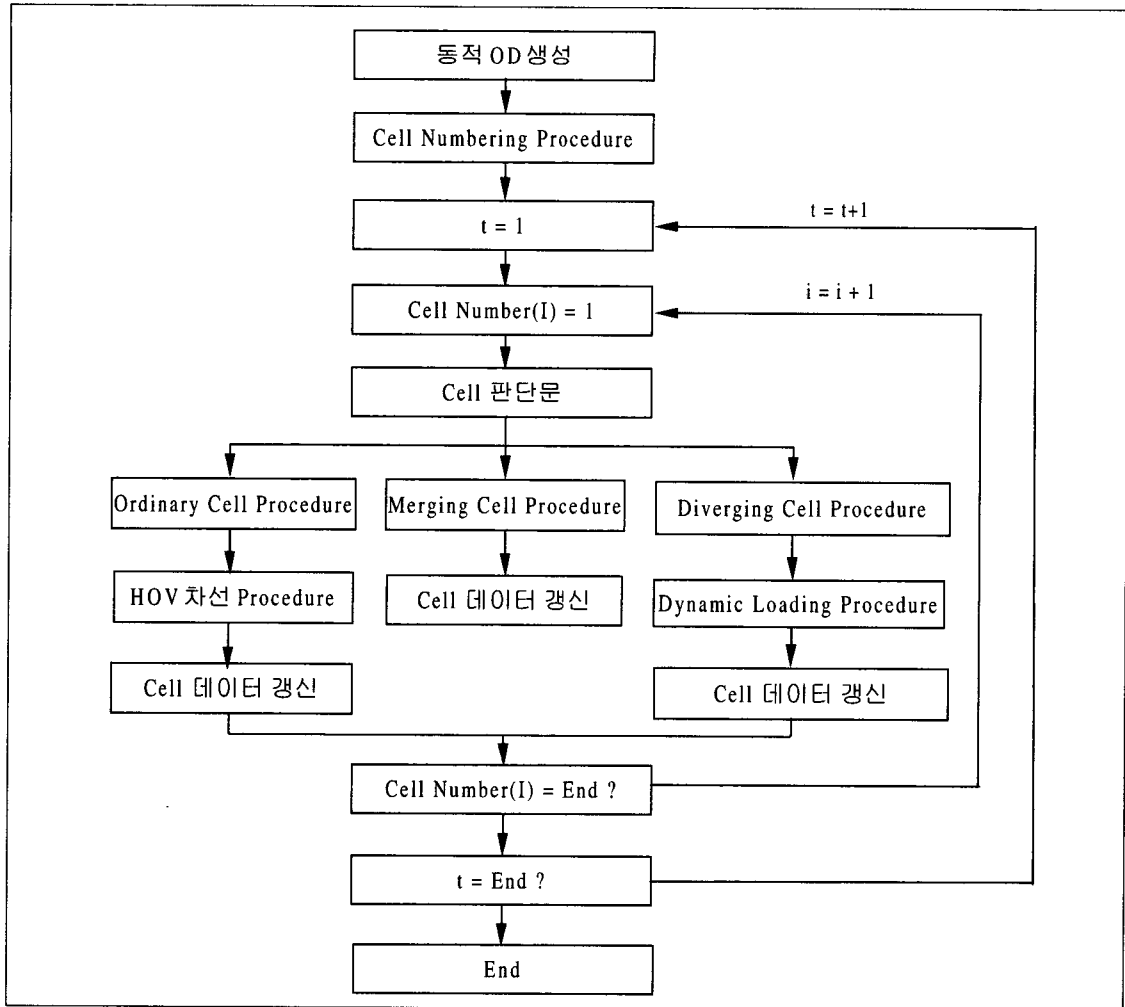
### 2. Cell Transmission Theory

이 모델은 복잡한 네트워크에 대해 각각의 링크를 동일한 특성을 가지는 구간으로 구분하여 거시적인 접근기법으로 교통류 이론을 제시한다. 이 모델에서 교통량과 밀도의 관계는 선형적인 관계로 고려되며 상류부 셀의 진출용량과 하류부 셀 진입용량의 최소값으로 진행가능한 교통량을 결정한다. High Order 모델처럼 교통류를 세밀하게 분석하지는 못하지만, 동일한 특성을 가지는 구간으로 구분하여 셀별 진출입 용량에 의해 차량을 전이시키므로 비교적 현실적이며, 쉽게 교통류를 구현할 수 있다. 또한, 큰 네트워크에 적용하기 쉽기 때문에 동적 통행배정 모형에 적용될 교통류 이론으로 적절하다고 판단된다.

## III. 모형 개발

본 연구는 기존 교통류이론인 Daganzo의 Cell Transmission Theory와 Special Lane Theory를 이용하여 동적분석모형을 구축하며 분석과정은 다음과 같다.

- 1) 아래식은 자가용과 버스가 각각 평형상태를 이룰 때 두 수단간 최소통행시간은 서로 다를지라도 통행시간 이외의 요소까지 고려되는 통행비용은 서로 같다는 것을 나타낸다.
- 2) Carlos F. Daganzo, 1996, A Continuum Theory of Traffic Dynamics for Freeway with Special Lanes, Transportation Research Part II.



<그림 1> 모형의 흐름도

1. 동적 O-D 발생 모듈

동적 O-D 발생모듈은 출발지 및 도착지간 교통량을 기존의 통행패턴을 이용하여 생성시키는 기능을 수행한다. 고속도로 톨게이트 진출입 교통량은 시간대별로 명확하게 구해질 수 있으며, '고속도로의 통행은 일반 네트워크와 같이 오전, 오후 2회에 걸쳐 첨두현상을 보이며 그 시간과 집중정도를 특성치로 갖는다'는 가정하에, 이를 함수의 형태로 표현하면 아래 식(1)<sup>3)</sup>과 같다.

$$P_{rs}(t) = \alpha \exp\left(-\frac{(t-t_{p1})^2}{\omega_1}\right) + \beta \exp\left(-\frac{(t-t_{p2})^2}{\omega_2}\right) \quad (1)$$

여기서,

$P_{rs}(t)$  : 시간t에서 출발지 r에서 도착지 s의 교통량비율

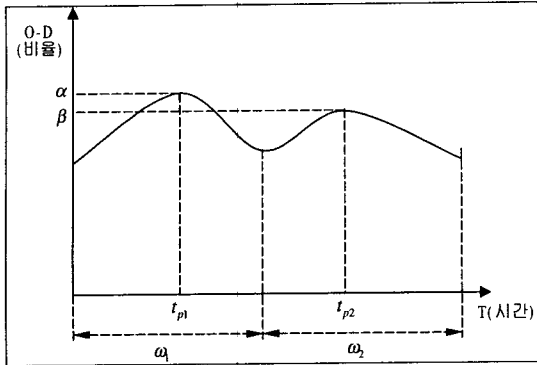
$\omega_1, \omega_2$  : 시간대별 교통량분포의 집중정도

$t_{p1}, t_{p2}$  : 첫 번째, 두 번째 첨두시간

$\alpha, \beta$  : 각 첨두시간의 집중정도

식(1)에서 시간대별 통행발생량은  $\alpha, \beta, t_{p1}, t_{p2}, \omega_1, \omega_2$ 에 의해 영향을 받으며, 이런 변수들은 기존 historical 데이터를 이용하여 추정한다. 식(1)를 이용하여 각 time slice별 교통량 비율을 구할 수 있으나, 본 연구에서는 Cell Transmission의 특성 및 분석상의

3) 조성빈(1990), 미시동태적 모형을 이용한 노선배정에 관한연구, 서울대학교 환경대학원, p.41.



(그림 2) 동적 O-D 발생

용이를 위해 특정한 시간대의 1시간 교통량비율을 구한 후 1시간내 각 time slice에 대해서 균일하게 분배하는 기법을 적용코자 한다. 1시간 교통량은 O-D 별 하루 총교통량과  $P_{rs}(t) / \sum_{i=1}^{24} P_{rs}(t)$ 의 곱으로 계산된다. 여기서,  $P_{rs}(t)$ 는 특정한 1시간대의 교통량 비율을 의미한다.

2. 수단선택 모듈

수단선택모듈은 O-D발생모듈에 의해 이미 생성된 각 time slice의 수단별 교통량을 이전시간대의 통행비용을 고려하여 재계산하는 역할을 수행한다. 먼저 분석가에 의해 의존통행자와 선택통행자의 비율이 정의되면, 선택통행자는 이전시간대의 수단별 총 통행비용을 고려하여 아래의 함수<sup>4)</sup>에 의해 수단선택과정을 거치게 된다. 수단별 총 통행비용은 수단별 통행시간, 통행요금, 차외대기시간 등의 합으로써 통행요금 및 차외대기시간은 분석가에 의해 input file에 정의되고, 수단별 O-D간 통행시간은 이전 시간대에 출발지에서 목적지까지 소요되는 평균통행시간으로 결정된다.

$$P_{bus} = \frac{1}{1 + \exp\{-\lambda(C_{auto} + \pi - C_{bus})\}} \quad (2)$$

여기서,

$\lambda$  : dispersion parameter(3.75로 가정)

$\pi$  : 승용차 선택에 대한 penalty(3.5로 가정)

$C_{auto}$  : 승용차 이용시 평균통행시간

$C_{bus}$  : 버스 이용시 평균통행시간

3. 교통류 진행 규칙

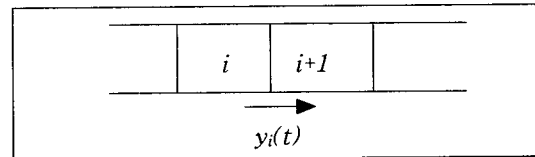
본 모형은 기존의 교통류 이론인 Daganzo의 Cell Transmission Theory와 Special Lane Theory를 이용하여 교통분석모형을 구축한다. Daganzo는 Cell Transmission 이론에서 (그림 3)에서와 같이 이전 셀 i의 진출용량과 다음셀 i+1의 진입용량을 고려하여 단위 시간대에 진행할 수 있는 교통량을 계산하였다. 또한, 합류부 및 분류부에 대해서도 차량전이현상을 설명할 수 있는 이론을 개발하였다.

1) 일반 셀(ordinary cell)

일반셀은 (그림 3)과 같이 노선분류와 합류현상이 발생하지 않는 셀을 의미하며, 버스전용차로와 같은 HOV차로에 대해서도 고려한다.

(1) 교통량 전이규칙

각 셀데이터는 목적지(d), 차종(l), 대기시간( $\tau$ )에 대해 구분되며, 일반셀에서의 차량전이과정은 다음과 같다.



<그림 3> 일반셀 구현

상류부셀 i에서 진행시킬 수 있는 최대교통량( $S_i(t)$ )은 단위시간당 통과용량( $Q_i$ )과 셀 i에 존재하는 교통량( $n_i$ )의 최소값으로 결정되며, 하류부셀 i+1에 진입할 수 있는 최대교통량( $R_{i+1}(t)$ )은 단위시간당 통과용량( $Q_{i+1}$ )과 셀내 존재할 수 있는 최대밀도와 현재 밀도의 차(여유밀도)의 최소값으로 결정된다. 상류부셀 i에서 하류부셀 i+1로의 전이교통량은  $S_i(t)$ 와  $R_{i+1}(t)$ 의 최소값으로 결정하게 된다.

4) J. de D. Ortuzar, L. G. Willumsen(1994), MODELLING TRANSPORT, JOHN WILEY & SONS, pp.194~196.

$$S_i(t) = \min \{Q_i, n_i(t)\} \quad (3)$$

$$R_{i+1}(t) = \min \{Q_{i+1}, \sigma_{i+1}[N_{i+1} - n_{i+1}(t)]\} \quad (4)$$

$$y_i(t) = \min \{S_i(t), R_{i+1}(t)\} \quad (5)$$

여기서,

- $Q_i$  : 상류부셀  $i$ 의 단위시간당 용량=셀용량  
(대/초/차로)×time slice length(초)  
×차로수
- $n_i(t)$  : time slice  $t$  동안 상류부셀  $i$ 에 존재  
하는 교통량= $\sum_r \sum_q \sum_d y_r^{kd}(i)$
- $N_i$  : 상류부셀  $i$ 에 존재할 수 있는 최대교  
통량=셀 길이(km)×최대밀도(대/km)
- $S_i(t)$  : 상류부셀  $i$ 에서 진행시킬 수 있는 최  
대교통량
- $R_{i+1}(t)$  : 하류부셀  $i+1$ 에 진입할 수 있는 최대  
교통량
- $\sigma_{i+1}$  : 하류부셀  $i+1$ 의 교통량-밀도의 관계식  
에서 충격파속도를 반영한 차량진행변수  
=후방충격파속도/전방충격파속도

여기서, 전이될 교통량( $y_i(t)$ )이 구해진다면 다음  
과 같이 셀 데이터를 갱신한다.

$$n_i(t) = n_i(t-1) - y_i(t) + y_{i-1}(t) \quad (6)$$

(2) HOV 차로 모듈

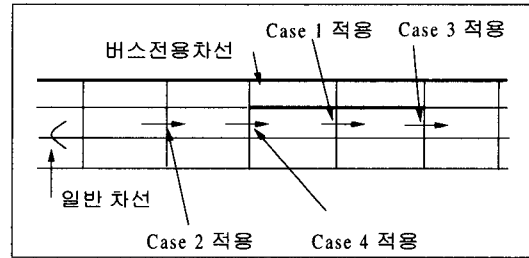
이 모델은 고속도로상에서 두 종류의 차량(일반차  
량 및 HOV 차량)이 존재할 때 각각의 차량이 진행  
할 수 있는 규칙을 정의해주며, 기존의 Daganzo의  
Special Lane Theory를 적용하였다.

〈Case 1〉 HOV차로가 설치된 셀간의 전이

$$y_i = \min \{s_i(k_i); r_{i+1}(k_{i+1})\}$$

$$Y_i = \min \{S_i(K_i); R_{i+1}(K_{i+1})\} \quad (7)$$

※ HOV 차로의 전이과정을 정의한 식(7)은 일반셀



〈그림 4〉 HOV 차로 구현

교통량 전이과정에서 정의한 식(3),(4),(5)와  
다소 차이가 있는데, 이는 상류부 및 하류부셀  
내에 존재하는 교통량을 수단별로 구분해야 하  
기 때문이다. 즉, HOV차로가 설치된 일반셀에서  
각 수단별 전이량은 식(3),(4)의  $n_i(t), n_{i+1}(t)$   
를 식(7)에서 사용된 변수  $k_i(t), k_{i+1}(t)$   
로 대체하여 식(3),(4),(5) 과정에 의해 각 수단  
별 전이량을 구하여야 한다. 아래에서 제시한  
각 Case에 대해서도 동일한 과정에 의해 계산  
된다.

〈Case 2〉 HOV차로가 설치되지 않은 셀간의 전이

$$y_i = (1 - \mu_i) \min \{S_i^T(K_i^T), R_{i+1}^T(K_{i+1}^T)\}$$

$$Y_i = \mu_i \min \{S_i^T(K_i^T), R_{i+1}^T(K_{i+1}^T)\} \quad (8)$$

〈Case 3〉 HOV차로가 설치된 셀에서 설치되지 않은  
셀로의 전이

$$K_{i+1}, k_{i+1} = (0, 0) \quad \text{if } K_{i+1}^T < K^0$$

$$= (\mu_i, 1 - \mu_i) K_{i+1}^T \quad \text{if } K_{i+1}^T > K^0 \quad (9)$$

하류부 셀의 수단별 밀도를 계산한 후 〈Case 1〉에  
적용한다.

〈Case 4〉 HOV차로가 설치되지 않은 셀에서 설치된  
셀로의 전이

$$\text{if } S_i^T(K_i^T) > R_{i+1}(K_{i+1}) + r_{i+1}(k_{i+1})$$

$$Y_i^T = r_{i+1}(k_{i+1}) + R_{i+1}(K_{i+1})$$

$$Y_i = \min \{R_{i+1}(K_{i+1}); \mu_i Y_i^T\}$$

$$y_i = Y_i^T - Y_i \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 &\text{if } S_i^T(K_i^T) \leq R_{i+1}(K_{i+1}) + r_{i+1}(k_{i+1}) \\
 &\quad y_i = s_i(k_{i+1}) \\
 &\quad Y_i = S_i(K_i) \qquad (11)
 \end{aligned}$$

여기서,

- $\mu_i, \mu_{i+1}$  : 상류부셀 i, 하류부셀 i+1의 HOV 차량비율
- $Y_i, y_i$  : 상류부셀 i에서 하류부셀 i+1로의 HOV 차량 및 일반차량의 전이량
- $K_i, k_i$  : 상류부셀 i의 HOV 차량 및 일반차량의 밀도
- $K_{i+1}, k_{i+1}$  : 하류부셀 i+1의 HOV 차량 및 일반차량의 밀도
- $K_i^T, K_{i+1}^T$  : 상류부셀 i 및 하류부셀 i+1의 총밀도
- $K^o$  : 최적밀도
- $Y_i^T$  : 총 전이교통량 ( $Y_i + y_i$ )
- $S_i^T, R_{i+1}^T$  : 상류부셀 i에서 총 진출용량 및 하류부셀 i+1의 총 진입용량
- $s_i, S_i$  : 상류부셀 i의 일반차량 및 HOV 차량의 진출용량
- $r_{i+1}, R_{i+1}$  : 하류부셀 i+1의 일반차량 및 HOV 차량의 진입용량

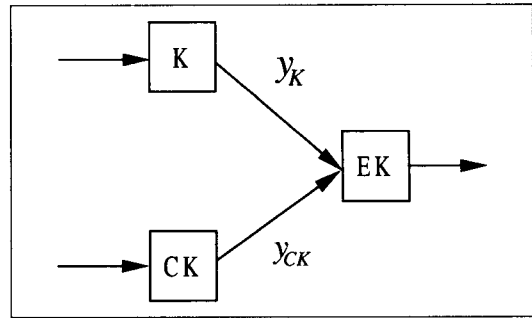
2) 합류부 셀(merging cell)

합류부셀은 2개의 일반셀이 합류될 때 전이과정을 구현해준다. 전체적인 진행과정은 일반셀과 동일하지만, 합류되는 2개의 셀 중 통행우선권을 선정해주는 것이 중요하다. 이 모형에서는 합류비율을 차로수로 정의하였다. 합류부셀의 전이과정은 다음의 식을 만족해야만 한다.

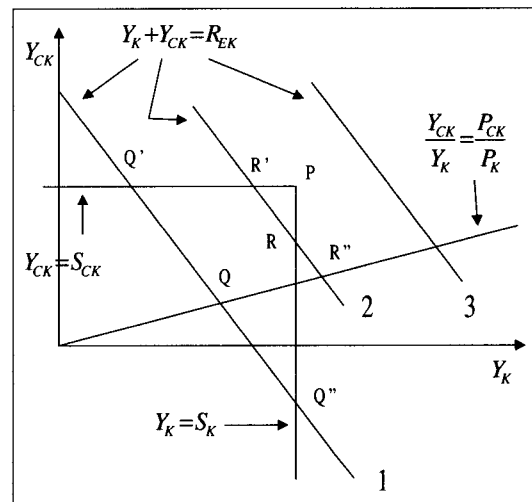
$$\begin{aligned}
 &y_K(t) \leq S_K ; y_{CK}(t) \leq S_{CK} \\
 &y_K(t) + y_{CK}(t) \leq R_{EK} \qquad (12)
 \end{aligned}$$

또한, 전이량은 다음과 같이 두가지로 구분되어 계산된다.

$$\begin{aligned}
 &\text{if } R_{EK} \geq S_K + S_{CK} \\
 &\quad y_K(t) = S_K \text{ and } y_{CK}(t) = S_{CK} \qquad (13)
 \end{aligned}$$



〈그림 5〉 합류부셀 구현



〈그림 6〉 합류부에서 발생가능한 교통현상도

$$\begin{aligned}
 &\text{if } R_{EK} < S_K + S_{CK} \\
 &\quad y_K(t) = \text{mid}\{S_K, R_{EK} - S_{CK}, \rho R_{EK}\} \\
 &\quad y_{CK}(t) = \text{mid}\{S_{CK}, R_{EK} - S_K, \rho R_{EK}\} \qquad (14)
 \end{aligned}$$

식(13)는 합류부셀(EK)의 진입용량이 상류부셀(K, CK)들의 진출용량 합보다 클 경우 K, CK셀의 모든 차량이 전이되는 것을 설명하며, 식(14)는 합류부셀의 진입용량이 상류부셀들의 진출용량보다 작을 경우 ( $R_{EK} < S_{BK} + S_{CK}$ ), 우선권계수( $\rho$ )를 이용하여 전이량을 구하는 과정을 설명하고 있다. 〈그림 6〉은 합류부 이전셀간의 우선권 및 진출용량과 합류부셀의 진입용량이 정의될 때 최적전이량을 구하는 과정을 설명하고 있다. 여기서, 이전셀인 K셀과 CK셀의 우선권비율은  $P_K : P_{CK}$ 이며, 진출용량은  $S_K, S_{CK}$ 이며, 합류부 EK셀의 진입용량은  $R_{EK}$ 이다. 선 1, 2는 식(14)에 해당하는 경우며, 선 3는 식(13)에 해당한다. Daganzo는 선

1과 2에 대해 우선권과 이전셀들의 진출용량을 만족하는 중간값(mid)을 찾아내었다. 예를 들어, 선 1의 경우 우선권비율을 만족하는  $Q$ 점이 최적해라는 것은 쉽게 파악될 수 있지만, 선 2의 경우는  $Y_K$ 가  $S_K$ 의 범위를 벗어나므로 우선권 비율을 만족하는  $R''$ 가 최적해가 될 수 없다. 따라서, 이와 같은 경우는  $R''$ 보다는  $R$ 점이 최적해가 된다. 식(13)과 (14)는 각각의 경우를 모두 만족하고 있다. 이렇게 합류부에 대한 전이 교통량이 구해지면 일반셀과 같이 셀 데이터를 갱신한다.

**3) 분류부 셀(diverging cell)**

기존에 Daganzo는 분류부셀에서 일정한 비율에 따라 차량을 배분하였다. 그러나 본 연구에서는 Cell Transmission 이론의 특성을 최대한 반영하여, 매 시간대별로 최단경로에 차량을 배분시키는 경험적 기법을 적용하였다.

**(1) 분류부 분할 모듈(Splitting Module)**

분류부 셀 데이터는 목적지별, 대기시간별, 차로별로 구분되어 존재하는데, 대기시간( $\tau$ )별, 목적지( $d$ )별, 차종( $l$ )별로 계속 반복하여 수렴조건이 만족할 때까지 차량을 전이시키는 경험적 기법을 적용하였다. 즉, 3가지의 수렴조건이 만족할 때까지 대기시간  $\tau$ 를 1씩 감소시키면서 목적지 및 수단별로 최단경로상에 차량들을 배분한다. 각 iteration마다 차량이 진행되면 비용갱신모듈에 의해 각 링크의 비용을 갱신한다. 여기서, 다음과 같은 2가지 조건이 가정되는데, 첫째, 운전자는 최단경로만을 선택하며, 둘째, 모든 차량은 FIFO 원리를 따른다는 것이다.

〈step 0〉 초기화

$$\tau = \max(\text{최대대기시간})$$

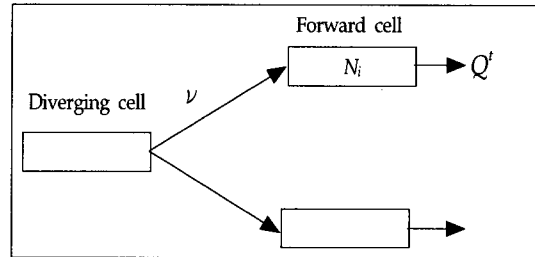
〈step 1〉 최단경로 탐색

〈step 2〉 차량 전이비율 결정

$$\text{If } y_r^{ld} \leq ACapa(fc) \rightarrow p=1$$

$$\text{If } y_r^{ld} > ACapa(fc) \rightarrow p = \frac{ACapa(fc)}{y_r^{ld}}$$

여기서,  $ACapa(fc)$  : forward cell의 진입용량



〈그림 7〉 분류부셀 구현

〈step 3〉 차량 전이

$y_r^{ld} \times p$  만큼 forward cell로 전이

〈step 4〉 비용 갱신

〈step 5〉 셀 데이터 갱신

〈step 6〉 수렴여부 확인

수렴조건을 만족하면 종료,

그렇지 않으면,  $\tau = \tau - 1$  (if  $\rho=1$ ) 혹은

$\tau = \tau$  (if  $\rho < 1$ ) 로 정의하고 〈step 1〉로 감.

수렴조건 1) 모든 목적지별, 수단별 최단경로상

forward cell의 진입용량이 0인가?

수렴조건 2) 분류부 셀에서 진행하고자 하는 교통량

이 0인가?

수렴조건 3) 대기시간  $z$ 가 0인가?

분류부분할모듈은 〈그림 7〉에서 분류부셀(diverging cell)에 존재하는 차량 중 먼저 대기시간이 max인 차량들에 대해 목적지 및 수단별로 위에서 제시한 단계대로 수행한다. 수렴조건 3가지중 1가지만 만족될 때까지 대기시간을 1씩 감소시키면서 이와 같은 과정을 반복하는데, 위에서 제시한 수렴조건이 내포하는 의미는 다음과 같다. 수렴조건 1은 모든 목적지 및 수단에 대해 최단경로상의 forward cell의 진입용량이 0일때 차량이 더 이상 진행될 수 없는 경우를 의미이며, 수렴조건 2는 분류부셀에서 더 이상 진행시킬 차량이 없는 경우이며, 수렴조건 3은 수렴조건 2와 같이 대기시간이 0이면 분류부셀에 더 이상의 차량이 남아있지 않다는 것을 의미한다.

(2) 비용갱신 모듈(Splitting Module)

분류부 분할모듈에서 각 iteration별로 교통량이 전이되면, 다음 iteration에서 최단경로를 탐색하기 위해 forward cell의 비용이 갱신되어야 하는데, 비용갱신모듈은 전이된 교통량에 대한 비용을 계산하여 forward cell의 비용을 갱신하는 기능을 수행한다.

예를 들면, <그림 8>에서 전이교통량이  $y$  일 때 이에 대한 비용  $c(y)$ 를 계산하여 기존의 비용에 추가해준다. 전이교통량( $v$ )에 따른 추가비용( $c(v)$ )는 다음의 식에 의해 계산된다.

$$\begin{aligned}
 &\text{if } v \leq \eta \\
 &\quad c(v) = t_a v \\
 &\text{if } \eta < v \leq \eta + Q^t \\
 &\quad c(v) = c(\eta) + (t_a + 1)(v - \eta) \\
 &\text{if } v > \eta + Q^t \\
 &\quad c(v) = c(\eta) + \left\{ \sum_{i=1}^z (t_a + z) Q^t \right\} + \\
 &\quad (t_a + z + 1)(v - (\eta + zQ^t))
 \end{aligned} \tag{15}$$

여기서,

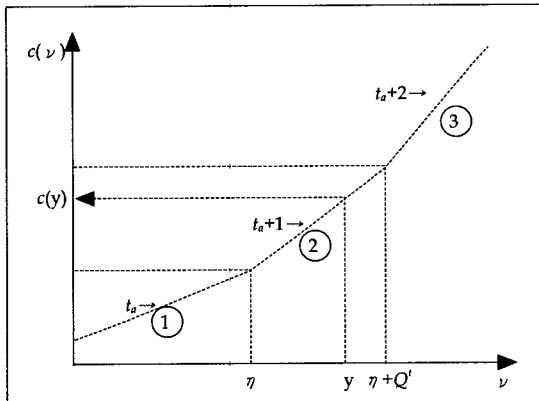
$t_a$  : 전이된 차량( $v$ )중의 선두차량이 forward 셀을 빠져나갈 때까지의 대기시간

$\eta$  : 전이된 차량 중  $t_a$ 시간대에 forward셀을 빠져나갈 수 있는 교통량

$Q^t$  : Forward cell의 진출용량

$n_i$  : forward cell에 존재하는 교통량

$$z = \frac{(v - \eta)}{Q^t}$$



<그림 8> 전이교통량과 비용의 관계

식(15)는 <그림 8>에서 전이교통량이 ①번( $v \leq \eta$  경우), ②번( $\eta < v \leq \eta + Q^t$ ), ③번( $v > \eta + Q^t$ )직선으로 구분하여 비용을 계산하는 과정을 설명한다. ③번의 경우 전이교통량의 선두차량이 ①번시간대에 빠져나간 후 ③번, ④번,....시간대동안 빠져나가지 못할 경우에 대해 공통적으로 적용될 수 있는 식이다.

$t_a$ 와  $\eta$ 는 다음의 식에 의해 결정된다.

$$t_a = INT\left(\frac{n_i}{Q^t}\right) \tag{16}$$

$$\eta = Q^t - MOD\left(\frac{n_i}{Q^t}\right) \tag{17}$$

전이차량에 대한 추가비용을 계산한 후 전이 전 forward cell의 비용에 더해준다.

4. 대기시간 결정 및 링크 비용함수 모듈

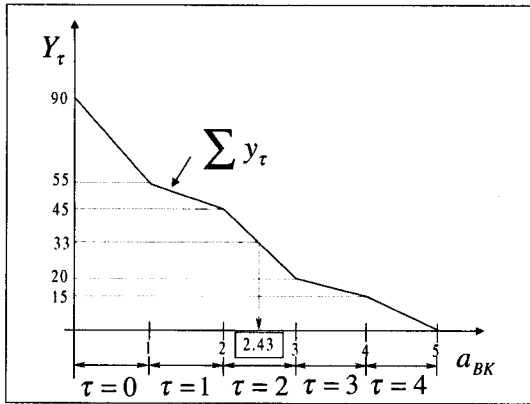
1) 대기시간 결정 모듈

대기시간 결정 모듈은 대기시간  $\tau$ , 목적지  $d$ , 차종  $l$ 로 구성되는 셀 데이터에서  $y_i$ 만큼의 차량이 다음 셀로 전이되었을 때 셀내 남아있는 차량의 최대대기시간 계산을 수행한다. 여기서 계산한 최대대기시간은 다음 시간대에서 1을 더하여 셀내 차량데이터를 계속 유지하게 된다. 즉, 현재 셀에 존재하는 차량들이 셀에 진입한지 몇번째의 time slice가 지났는가에 대한 정보를 갱신하는데 이용된다. 차량 전이전의 셀내 최대대기시간을 max, 대기시간이  $\tau$ 인 차량수를  $y_\tau$ , 각 대기시간( $\tau$ )별 차량대수( $y_\tau$ )의  $\tau$ 에서 최대 대기시간(max)까지 누적대수를  $Y_\tau$ 로 정의한다. <그림 9>는  $\tau$ 에서 max까지의 누적대수( $Y_\tau$ )를 그림으로 도시한 것이다.  $Y_\tau$ 를 모든  $\tau$ 에 대해 만족하는 일반적인 함수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$Y_\tau = \sum_{\tau} y_\tau - \left( \sum_{\tau} y_\tau - \sum_{\tau+1}^{\max} y_\tau \right) (a_{BK} - \tau) \tag{18}$$

차량 전이후의 최대대기시간을 계산하기 위해서는 전이교통량을 먼저 구한 후 식 (20)의  $Y_\tau$ 에 대입한 후,  $a_{BK}$  값을 구해야 한다.





〈그림 9〉 τ에 따른 대기차량

$$a_{BK} = \frac{\sum_{\tau}^{\max} y_{\tau} - Y_{\tau}}{\sum_{\tau}^{\max} y_{\tau} - \sum_{\tau+1}^{\max} y_{\tau}} + \tau \quad (19)$$

예를 들어 설명하면, 〈그림 9〉에서와 같이 33대가 현재셀에서 다음셀로 전이되었을 경우, 남아있는 차량의 최대대기시간은 2.43이 되며, 다음시간대에서는 최대대기시간은 1을 합한 값인 3(3.43)이 되며, 대기시간이 3인 차량은 12(45-33)이 되며, 2인 차량은 10대, 1인 차량은 35대가 된다.

2) 링크 비용함수

이 모델에 적용되는 링크비용함수는 크게 2가지 요소로 구분되는데, 첫째, 교통량이 자유여행속도로 링크를 여행하는 시간과 둘째, 링크에 진입한 후의 지체시간이다. 셀내에 존재하는 차량들은 목적지별(d), 차종별(l), 대기시간별(τ)로 구분되기 때문에 차량이 셀에 진입한 후부터 소요된 시간이 계산될 수 있다. 즉, 셀내의 모든 차량의 대기시간 평균을 평균지체시간이라고 정의한다. HOV 차량이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우를 고려하여 링크 지체시간을 다음과 같이 구할 수 있다.

① HOV차량이 존재하지 않는 경우(HOV 차로 및 일반차로 공동)

평균 지체시간 =

$$\sum_{\tau} \tau \times y_{\tau}^{ld} / \sum_{\tau} y_{\tau}^{ld} \quad \text{for } l = 1, 2 \quad (20)$$

② HOV차량이 존재하는 경우

· HOV차로 : 평균지체시간 =

$$\sum_{\tau} \tau \times y_{\tau}^{ld} / \sum_{\tau} y_{\tau}^{ld} \quad \text{for } l = 1 \quad (21)$$

· 일반차로 : 평균지체시간 =

$$\sum_{\tau} \tau \times y_{\tau}^{ld} / \sum_{\tau} y_{\tau}^{ld} \quad \text{for } l = 2 \quad (22)$$

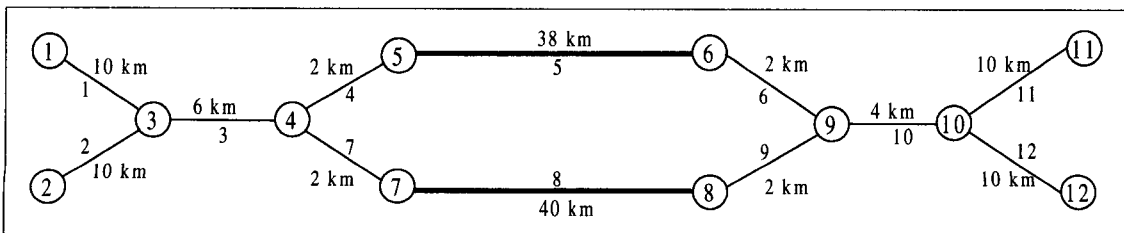
※ 링크 평균통행시간은 cell을 자유속도로 여행하는데 소요되는 단위 time slice길이에 평균지체시간을 합한 값이 된다..

5. 최단경로 알고리즘

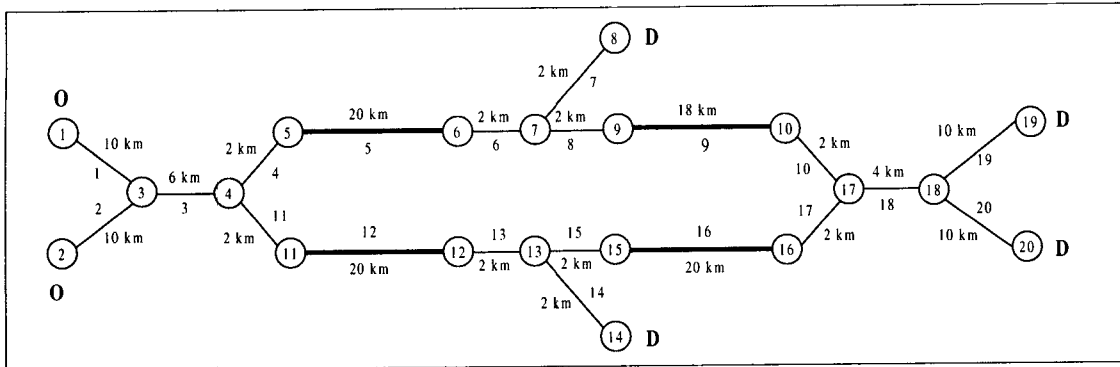
최단경로탐색은 일대다(one-to-many)의 노드에 대해 고려한다. 즉 분류부 셀에서 모든 목적지까지의 최단경로를 탐색한다. 최단경로 알고리즘은 기존의 Floyd 알고리즘을 이용하여 최단경로를 탐색한 후 가로행렬(node sequence matrix)에 전치행렬을 취해줌으로서 분류부 셀에서 최단경로상에 진행할 다음 노드(forward cell)를 찾아준다.

IV. 모형의 분석 및 검증

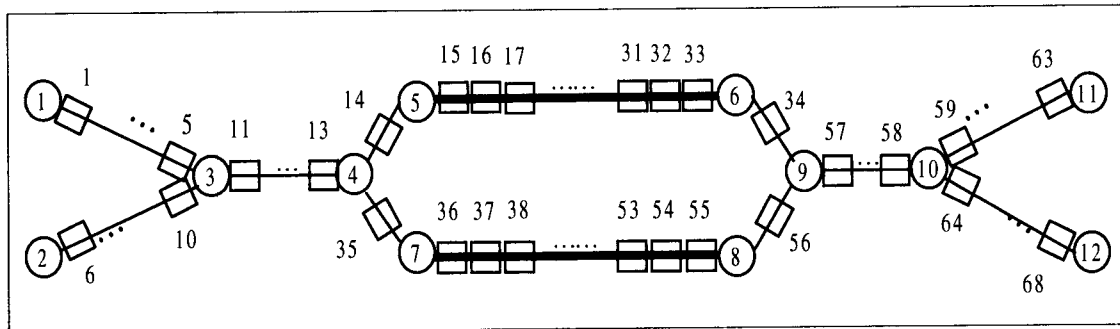
본 연구에서 구축한 모형을 가상네트워크에 적용함에 있어 단위 셀길이를 2km, 자유속도를 100km/h, 차로별 용량을 0.6대/초, 최대밀도로 140대/km, 단위 time slice 길이는 단위셀을 자유속도로 여행하는데 소요되는 72초로 정의하였다.



〈그림 10〉 적용 네트워크 I



〈그림 11〉 적용 네트워크 II



〈그림 12〉 Cell Numbering 결과

1. 적용 대상 네트워크

※ 〈그림 10〉에서 굵은 선으로 도시된 5번, 8번 링크와 〈그림 11〉에서 5번, 9번, 12번, 16번 링크는 HOV 차로가 설치되어 있는 링크이다.

2. 분석결과

1) 네트워크 I

(1) Cell Numbering Procedure

(2) 셀 전이과정 검증

혼잡한 상태에서의 교통량 전이현상을 분석하기 위해 10번 링크의 차로(57, 58번셀)를 2차로로 감소시켜 시뮬레이션을 하였다.

① HOV차로가 존재하는 셀간의 전이

57번 셀이 4차로에서 2차로로 감소함으로써 병목 현상이 발생한다. 이에 대한 영향으로 56, 55, 54번 셀로 Queue spill back 현상이 발생한다. 시간대

〈표 1〉 HOV차로가 존재하는 셀간의 전이(Case 1)

시간대	54번셀내 교통량		전이 가능 교통량	대기 시간		55번셀내 교통량		전이 교통량	
	승용차	버스		승용차	버스	승용차	버스	승용차	버스
76	65	10	75	0.00	0.00	516	87	65	10
77	82	10	68	0.10	0.00	538	91	58	10
78	128	9	39	0.70	0.00	533	95	29	10
79	168	9	45	1.32	0.00	531	99	35	9
80	205	10	47	1.73	0.00	532	102	37	9
81	241	10	47	2.33	0.00	535	106	37	10
82	285	9	43	2.81	0.00	532	110	32	10

77부터 일반차로는 지체가 발생하는 반면, HOV차로는 지체가 발생하지 않고 있다. 이는 병목구간을 HOV 차량이 일반차량보다 빨리 빠져나갈 수 있다는 것을 의미한다. 시간대79, 80에서 전이가능교통량과 전이 교통량이 일치하지 않는 경우가 발생하는데 이는 소수점계산의 절삭현상의 결과로 파악된다.

② HOV차로가 존재하지 않는 셀과 존재하는 셀간의 전이  
일반차로가 3차로인 35번셀에서 일반차로가 2차

〈표 2〉 HOV차로가 존재하지 않는 셀과 존재하는 셀간의 전이

시간대	35번셀내 교통량		전이 가능 교통량	대기 시간		36번셀내 교통량		전이 교통량	
	승용차	버스		승용차	버스	승용차	버스	승용차	버스
	57	66	10	75	0.01	0.00	65	10	65
58	76	10	75	0.01	0.00	65	10	65	10
59	76	11	85	0.01	0.00	75	10	75	10
60	79	10	85	0.01	0.09	75	9	75	9
61	79	12	85	0.03	0.12	75	9	75	9
62	81	12	85	0.06	0.09	74	10	74	10
63	85	11	85	0.09	0.10	73	10	73	10

로, HOV차로가 1차로인 36번셀로 전이될 때 35번셀내 교통량이 전이가능교통량보다 많은 시간대 60부터 지체가 점점 증가하기 시작한다. HOV차로가 설치되어 일반차로는 3차로에서 2차로로 감소하기 때문에 일반차량의 지체는 점차 증가하며, HOV 차량은 FIFO 원리에 의해 조금씩 지체를 경험하는 것으로 분석된다.

③ 합류부 셀에서의 전이

시간대 29에서는 34번셀에만 73대의 교통량이 존재하기 때문에 모두 57번 셀로 전이되었지만, 다음시간대부터는 43대씩 동일하게 전이되는데, 이는 우선권을 차로수로 지정하였기 때문이다.

〈표 3〉 합류부 셀에서의 전이

시간대	34번셀				56번셀				57번셀 진입 교통량
	승용차	버스	전이 가능 교통량	대기 시간	승용차	버스	전이 가능 교통량	대기 시간	
29	64	9	73	0.0000	0	0	0	0.0000	73
30	45	10	43	0.3281	53	10	43	0.3065	86
31	67	13	43	0.7260	71	12	43	0.6892	86
32	78	7	43	1.2037	81	17	43	1.1731	86
33	99	11	43	1.5303	103	32	43	1.5000	86
34	110	19	43	1.8904	115	35	43	1.8592	86
35	131	28	43	2.3485	136	36	43	2.3065	86

④ 분류부 셀에서의 전이

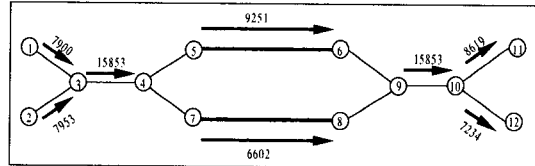
노드 4-5-6-9번으로 연결되는 노선 1이 노드 4-7-8-9로 연결되는 노선 2보다 거리가 2km 짧기 때문에 시간대 9에서 노드1의 14번 셀로 많은 차량이

〈표 4〉 분류부 셀에서의 전이

시간대	13번 셀		노선1 비용	14번 셀		노선2 비용	35번 셀	
	승용차	버스		승용차	버스		승용차	버스
9	101	21	0	65	10	0	53	9
10	101	21	275	45	10	272	56	11
11	101	21	321	56	11	330	45	10
12	101	21	378	45	10	375	56	11
13	101	21	423	56	11	432	45	10
14	101	21	480	45	10	477	56	11
15	101	21	525	56	11	534	45	10

차량이 배분되는 것을 알 수 있으며, 다음시간대 10에서는 노선2의 비용이 노선1의 비용보다 낮기 때문에 노선2의 35번셀로 많은 차량이 배분되는 것으로 분석된다. 초기 시간대 9에서 노선비용이 0인 것은 배분된 차량이 없기 때문이며, 병목구간(57번 셀)의 영향을 받지 않는 시간대에서는 단순한 배분형태를 보여주고 있다.

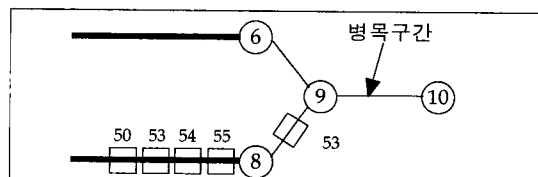
(3) 동적 동행배정 결과



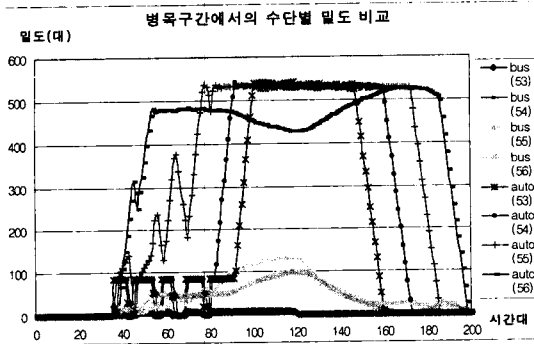
〈그림 13〉 동적동행배정 결과

(4) 병목구간에서의 차종별 밀도분석

〈그림 15〉는 병목구간 분석을 위해 10번 링크의 차로를 2차로로 감소시켜 병목구간 이전셀들의 수단별 밀도비교를 수행한 결과이다. 병목구간의 영향으로 이전셀에서 차량의 밀도가 시간대에 따라 점점 높아지는 것을 알 수 있는데, 승용차의 경우 53번 셀까지 대기행렬이 발생하고 있지만 HOV차량들은 55번 셀까지만 대기행렬이 발생하고 있다. 이는 일반차량에 비해 HOV차량이 빠른 시간내에 병목구간을 빠져나갈 수 있다는 것을 의미한다.



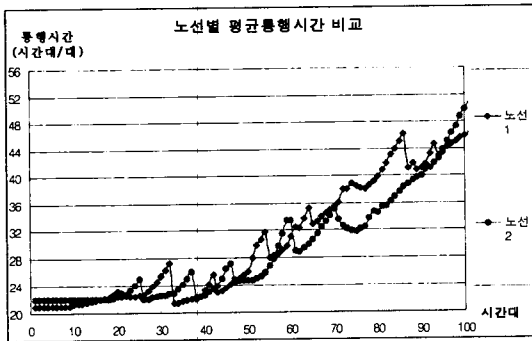
〈그림 14〉 병목구간 도시



〈그림 15〉 병목구간에서의 차종별 밀도분석

(5) 노선별 평균통행시간 비교

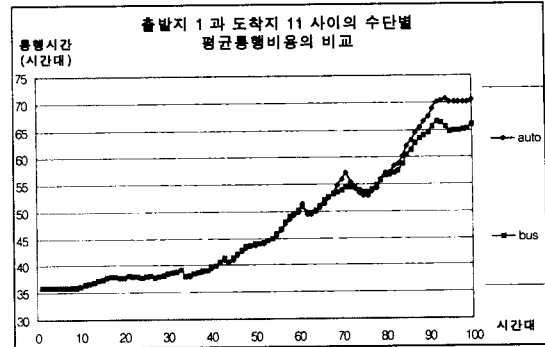
〈그림 16〉은 4번 노드와 9번 노드 사이의 2노선에 대해 동적통행배정에 따른 평균통행비용을 도시한 것이다. 수학적 모형과는 달리 평균통행비용이 균형상태를 이루지는 못하고 시간대에 따라 노선별 평균통행비용이 교차하고 있다. 이는 차량증가에 의한 지체효과가 차량배분 즉시 발생하는 것이 아니라 차량이 병목구간에 도달했을 때 발생하기 때문이다. 두 노선간 평균통행비용의 오차를 줄이기 위해서는 차량증가에 의한 단기에측기법이 포함되어야 한다고 판단된다.



〈그림 16〉 노선별 평균통행시간 비교

(6) 수단간 평균통행비용 비교

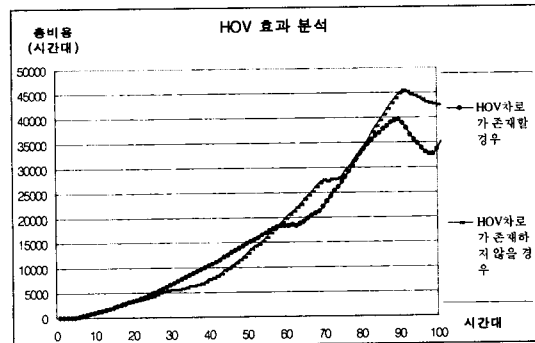
〈그림 17〉은 출발지 1과 도착지 11사이의 수단별 평균통행비용을 비교한 것이다. 초기에는 수단선택모형에 의해 수단간 통행비용이 유사하게 진행되지만 병목현상에 의해 지체가 증가할수록 수단별 비용차이가 심해지고 있는 것을 알 수 있다. 이는 HOV차로에 의한 영향 및 의존통행자에 의한 영향으로 분석된다.



〈그림 17〉 수단간 평균통행비용 비교

(7) HOV 차로 효과분석

〈그림 18〉은 노드 3번과 노드 10번 사이의 전 링크에 대해 HOV차로를 설치했을 경우와 설치하지 않았을 경우에 대해 총통행비용을 도시한 것이다. 지체도가 낮은 구간인 시간대 23과 시간대 57사이에서는 HOV차로를 설치하지 않은 경우가 총 통행비용이 낮은 반면에, 시간대 57 이후에는 HOV차로를 설치한 경우가 총통행비용이 낮은 것을 알 수 있다. 이는 교통량이 많아지고, 병목구간등과 같은 요소에 의해 지체도가 일정수준이상 높아질 경우, HOV차로를 설치하는 것이 총 통행비용의 감소효과를 가져온다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 분석은 고속도로 교통량에 따른 HOV차로 설치여부 파악에 이용될 수 있다.



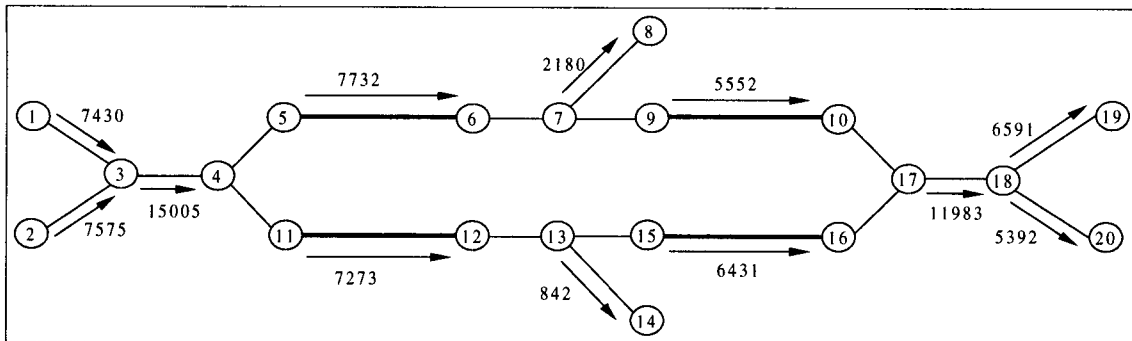
〈그림 18〉 HOV 차로 효과분석

2) 네트워크 II

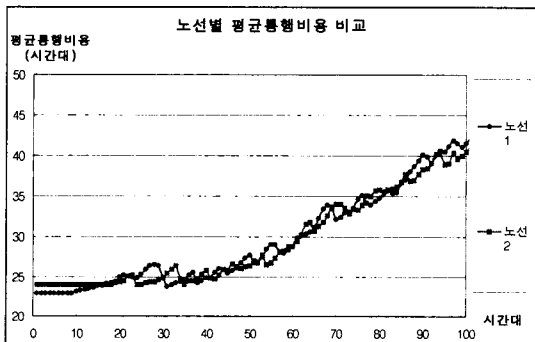
(1) 동적통행배정 결과

(2) 노선별 평균통행비용의 비교

〈그림 20〉은 동적통행배정시 시간대에 따른 노선별 평균통행비용을 도시한 것이다. 네트워크 I과비



〈그림 19〉 동적통행배정 결과(네트워크 II)



〈그림 20〉 노선별 평균통행비용의 비교

교해보았을 때 노선별 비용이 더 유사하게 배분이 진행되고 있는 것을 알 수 있다. 즉, 네트워크가 복잡해질수록 균형상태에 근접해진다는 것을 의미한다.

### V. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 기존 교통류이론 중 Daganzo의 cell transmission theory과 special lane theory를 이용하여 동적분석모형을 구축하고 이 모형에 적합한 동적통행배정기법을 휴리스틱(heuristic) 기법으로 개발하였다.

이 모형은 기존 모형과 몇가지 차별성을 가지고 있는데, 첫째, 고속도로에서 가장 이슈가 되고 있는 HOV 차로분석을 시행할 수 있으며, 둘째, 자유통행 시간과 지체시간으로 구분하여 링크통행비용을 계산한다. 셋째, 동적통행배정시 분류부 셀에서 차량의 목적지, 대기시간, 차종별로 최단경로를 탐색하여 차량을 배분하는 기법을 적용하였다는 것이다.

이 모형의 장·단점을 검토하면, 장점으로 첫째, 거시적모형으로 접근한 결과 국가차원의 고속도로 네

트워크에 쉽게 적용할 수 있으며, 둘째, HOV차로 효과분석을 시행할 수 있으며, 셋째, 현실적인 링크통행비용을 예측할 수 있으며, 넷째, 실시간적인 동적통행비용모형으로 ITS체계 중 ATMS와 ATIS와 연계하여 이용될 수 있다는 것이다. 단점으로는 개별차량의 행태분석을 시행할 수 있는 미시적 모형과는 달리 추종이론과 차로변경 등의 분석이 어렵다는 것이다.

이 모형이 현실화되기 위해서는 몇가지 향후과제를 내포하고 있는데, 먼저 이론단계를 살펴보면, 첫째, 분류부에서 HOV차로가 설치되어 있을 경우 이를 분석할 수 있는 명확한 이론개발이 필요하며, 둘째, 동적통행배정 모듈에서 비용갱신시에 램프 및 사고에 의한 급격한 비용증가를 예측할 수 있는 단기예측 모듈이 필요하다. 다음으로 응용단계를 살펴보면, 본 모형에서는 모형개발의 특성상 임의의 변수값을 설정하였지만 실제 이용되기 위해서는 고속도로별 특성에 맞는 변수값 추정이 요구되며, 실제 데이터를 이용한 고속도로 분석을 통해 모형검증 작업이 요구된다.

이와 같은 향후과제를 추후에 보완한다면 우리나라 고속도로 운영 및 계획시 아주 유용하게 이용될 수 있으리라 판단된다.

### 참고문헌

1. Carlos F. Daganzo (1994), The Cell Transmission Model, Transportation Research Part II.
2. Carlos F. Daganzo (1996), A Continuum Theory of Traffic Dynamics for Freeway with Special Lanes, Transportation Research Part II.
3. Lee seunjae (1994), Mathemaical Programming Algorithms for Equilibrium Road Traffic

- Assignment, PhD thesis, Univ. College London.
4. Bongsoo Son (1996), A Study of G. F. Newell's "Simplified Theory of Kinematic Waves in Highway Traffic", PhD thesis, Univ. of Toronto.
  5. Yosef Sheffi (1985), Urban Transportation Networks.
  6. Juan de Dios Ortuzar, Luis G. Willumsen (1994), Modelling Transport-Second Edition
  7. M. G. H. Bell, Y. Iida (1997), Transportation Network Analysis.
  8. Carlos F. Daganzo (1995), Properties of Link Travel Time Functions under Dynamic Loads, Transportation Research Part II.
  9. C. J. Messer et al (1997), Traffic Flow Theory.
  10. Hamdy A. Taha (1997), Operation Research.
  11. 조성빈 (1990), "미시동태적 모형을 이용한 노선배정에 관한 연구", 서울대 석사학위 논문.
  12. 임용택 (1997), "동적통행배정모형의 비교연구", 서울시정연구.
  13. 양천주 (1997), 한글 Visual Basic 5.0 바이블.