

■ 論 文 ■

# Moving Cell Theory를 이용한 동적 교통망 부하 모형의 개발

Dynamic Network Loading Model based on Moving Cell Theory

김 현 명

((주)하이콘엔지니어링 기술연구소 선임연구원)

## 목 차

I. 서론	3. Simulation loading algorithm
II. 동적 부하기법의 교통류 모형 검토	IV. Model Simulation Results
1. Deterministic queuing model	1. 입력자료
2. Cell transmission model	2. Flow simulation results
3. Moving segment model	3. Flow propagation by moving cell
III. Simulation Based Moving Cell Model	V. 결론
1. Notation	참고문헌
2. Flow propagation model	

Key Words : 동적 네트워크 부하(Dynamic Network loading), Cell-following rule, Moving Cell theory, 합류 및 분류 모형, 동적 교통류 특성

## 요 약

본 연구에서는 Moving Cell theory에 기반한 DNL(Dynamic Network Loading) 모형을 개발하고 이를 이용해 혼잡이 존재하는 교통망에서 교통류가 갖는 동적 특성을 분석하였다. 제시된 모형에서는 동일 시간대에 링크에 진입하는 교통량을 하나의 Cell로 형성하고 Cell following rule에 따라 링크에서 진행시킨다. 기존의 DNL 모형들은 링크에서 발생하는 물리적인 대기행렬을 묘사하기 위해 연속성을 갖는 단일 링크를 주행구간과 대기행렬 구간으로 분리하여 링크에서 발생하는 동적 상태(state)를 주행과 대기로 간단히 묘사하는 방법을 사용하고 있다. 하지만, 이러한 기법은 교통류의 다양한 동적 특성을 묘사하는데 한계점을 가지고 있었다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 본 연구에서는 오염물질 확산분석 등에 주로 이용되었던 Lagrangian method과 차량 추종모형을 결합한 Moving Cell theory를 개발하였다. Moving Cell theory하에서 차량군(platoon)은 Cell로 표현되며, 각 Cell들은 추종이론에 따라 진행하게 된다. 이러한 Moving Cell 기반의 시뮬레이션 모형은 이미 Cremer et al.(1999)에 의해 제시된 바 있으나, 그 분석 대상이 고속도로 본선구간이었기 때문에 합류나 분류문제를 풀 수 있는 모형을 제시하지 못하였고, Cell이 포함 가능한 차량대수를 인위적으로 설정하는 등 기초적인 수준을 크게 벗어나지 못하였다. 본 연구에서는 위의 연구들이 갖는 한계점을 극복할 수 있는 새로운 형태의 Moving Cell theory를 개발함으로써, 교통류의 연속적인 동적 특성 변화를 Cell의 이동과 상태 변화를 통해 재현하였다. 개발된 모형은 합류와 분류가 존재하는 간단한 가상교통망에서 실행되었고, 기존 DNL 모형에 비해 향상된 동적 교통류 묘사능력을 얻을 수 있었다.

## 1. 서론

Merchant와 Nemhauser(1978a, b)가 최초의 모형을 제시한 이후, 동적 통행배정 모형들이 많은 연구자들의 주목을 받게 되면서 좀 더 현실적인 교통류 재현능력을 갖는 모형 개발에 관심이 모아지고 있다. 잘 알려진 바와 같이 1990년대 초반까지는 링크 교통량에 종속적 관계를 갖는 동적 통행비용함수를 이용한 동적 통행배정 모형들이 주로 개발되었으나, 이들 모형들에서 사용하는 FIFO제약이 동적 통행비용함수와 결합할 경우 목적함수에 비볼록(Non-convex) 문제를 발생시켜 최적해를 구하기 어렵다는 점이 많은 연구에서 지적되어 왔다(Carey, 1992; Ran & Boyce, 1996).

교통량 증가에 따른 링크 통행시간의 지수적 증가 행태를 설명하기 위해서는 BPR(Bureau of Public Roads)식 형태의 지수증가식을 이용하여야 하지만 교통량 증가에 대해 통행시간 증가의 민감도가 높은 통행시간함수를 이용할 경우 단위 시간대의 크기에 비해 통행시간 감소 폭이 더 커지는 현상이 발생하여 더 늦게 링크에 진입한 차량들이 더 일찍 링크를 빠져나가는 현상이 나타난다(Carey, 1992). 이러한 현상을 막기 위해 동적 통행시간 함수를 사용하는 모형들은 대부분 FIFO 제약식을 적용하고 있으나 이처럼 볼록(Convex)형태의 목적함수식을 제약하는 제약식을 추가할 경우 목적함수의 형태가 비볼록 형태가 될 수 있어 수학적 최적화 기법을 통한 최적해 도출을 보장할 수 없는 상황이 발생한다(Carey, 1992).

이렇게 FIFO 제약에 의한 문제뿐만 아니라 현재 링크에 진입한 교통량보다는 이전 시간대에 걸쳐 유입된 교통량의 영향이 현재 시간대의 통행시간에 미치는 영향이 훨씬 큰 "비용함수의 비대칭 구조 문제", 링크의 동적 상태(kinetic state 또는 dynamic state)를 단일한 또는 2개 정도의 state로 밖에는 모형화할 수 없다는 문제점 등에 의해 통행시간함수 접근법(Travel time function approach)은 동적 통행배정모형에 적용하는데 많은 문제점을 가지고 있다.

이러한 문제 인식에서 일부 연구자들은 전통적인 대기행렬이론(Deterministic queuing theory)을 동적 통행배정에 적용하는 문제를 검토하였다(Drissi, 1992; Kuwahara & Akamatsu, 1997; Li Jun et al., 2000; Tong & Wong, 2000, Huang & Lam,

2002). 대기행렬 이론을 동적 통행배정에 이용할 경우 각 시간대에서 추가로 발생할 수 있는 최대 지체 시간의 크기는 분석 시간대의 크기가 되기 때문에 FIFO제약이 없이도 FIFO 조건이 위반되지 않는다. 이러한 개념을 통해 동적 통행배정 모형을 구축하는 것을 Point theory라 하는데, 모형에서는 링크의 유출부에서 대기행렬이 수직적으로 무한대까지 쌓일 수 있다는 가정을 이용한다.

Point theory에 근거한 동적 통행배정모형은 일부 제약식들(주로 비음 제약들과 FIFO제약)을 효과적으로 소거할 수 있고, 링크의 대기행렬의 길이를 계산할 수 있다는 장점을 갖지만, 수직형 대기행렬가정을 이용하기 때문에 대기행렬의 물리적 길이가 상류부 교통류(upstream traffic flow)에 미치는 영향(Spill-back)을 묘사할 수 없다. Adamo et al.(1999)은 이러한 문제에 주목하고 대기행렬 이론에 물리적인 대기행렬을 재현할 수 있는 모형을 결합하여 Horizontal model을 개발하였다. 그는 모형을 이용해 하류부에서 발생한 대기행렬이 링크 유입부까지 전파되고, 상류부 링크에 Spill-back 현상을 일으키는 상황을 재현하였다. 그러나 그는 대기행렬 이론에 근거한 모형은 대기행렬의 동적 교통류 특성을 재현해낼 수 없고, 링크에서 항상 backward wave만이 발생하게 되는 한계점을 지적하였다. 링크에서 backward wave만이 발생하는 경우, 대기행렬의 전파(propagation)는 불안정한 교통류 상태(unstable flow state)에서 나타나는 정지와 주행이 반복되는 현상(Stop and go 또는 Go and stop)을 묘사할 수 없기 때문에, 대기행렬 형성에 따른 용량저하 현상 같은 혼잡구간의 동적 특성을 설명할 수 없다.

이렇게 교통망상에서 교통류의 동적 특성을 현실과 가깝게 설명하는데 초점을 맞춘 모형들을 일반적으로 Dynamic Network Loading(DNL) 모형이라 부른다. 이 모형들에서는 각 시간대별 기종점 교통량의 경로는 이미 알려져있다는 가정 하에 링크 내 교통류의 전파(propagation), 합류, 분류 등을 재현하게 된다. 대표적인 예로는 Cell transmission model(Daganzo, 1994, 1995)내의 Propagation model이나 Horizontal model(Adamo et al., 1999), Moving Segment model(Cremer et al., 1999) 등이 있고 NETSIM과 같은 Micro simulation 모형도 이러한 범주로 구분할 수 있다.

본 연구에서는 DNL model들이 갖는 문제점 즉, 링크 내 교통류 진행시 발생할 수 있는 다양한 shock wave의 묘사, 대기차량들이 갖는 가·감속 특성, 합·분류시 상류부와 하류부 교통류간의 현실적인 묘사력 부족 등을 향상시킬 수 있는 새로운 DNL 모형화 기법을 제시하였다.

## II. 동적 부하기법의 교통류 모형 검토

본 장에서는 기존 DTA(Dynamic Traffic Assignment) 모형이나 DNL(Dynamic Network Loading) 모형에서 이용된 교통류 모형들의 특징과 한계에 대해 설명하였다.

### 1. Deterministic queuing model

서론에서 간단히 언급한바와 같이 DNL 분야에서 가장 많이 이용되어온 모형은 대기행렬 모형이다. 대기행렬 모형은 대기행렬의 모형화 접근법에 따라 Point model과 Horizontal model로 나눌 수 있는데 현재 까지 발표된 대부분의 연구들은 Point 가정을 이용하는 것이다(Drissi,1992; Kuwahara & Akamatsu, 1997; Li Jun et al., 2000, Huang and Lam, 2002).

최근에 Adamo et al.(1999)은 교통망의 Spill-back 현상을 고려할 수 있는 Horizontal model을 개발하였다. 이 모형은 크게 링크모형과 노드모형으로 구성되는데, 링크모형은 링크에서의 교통류 전파를 재현하는 역할을 하며, 노드모형은 링크간 합류와 분류문제를 계산하게 된다.

〈그림 1〉에서  $x$ ,  $x^{in}$ ,  $x^{out}$ 는 각각 링크 교통량, 유입교통량, 유출교통량을 의미하며, 첨자  $r$ 과  $q$ 는 각각 주행구간과 대기행렬 구간을 의미하는 것이다.  $t$ 는 현재의 시간대(interval)을 나타낸다. Horizontal model의 핵심적인 개선사항은 링크의 주행시간 및

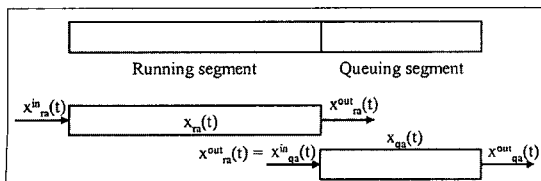
주행 가능거리가 대기행렬의 길이에 따라 가변적이라는 점이다. 즉, 대기행렬이 링크 전체를 점유하는 경우 링크의 여유용량은 0이 되고, 주행거리 역시 0이 되어 상류부 링크로 대기행렬이 전파되는 Spill-back 현상을 묘사할 수 있다.

노드모형의 경우 노드로 유입되는 링크의 유출교통량( $x_{qa}^{out}(t)$ )을 유출 수요(demand)로 간주하고, 이 값과 노드와 연결된 하류부 링크의 최대 공급용량(링크의 유출용량( $q^{max}$ ))을 비교해 상류부 링크에서의 유출량을 결정한다. 상류부 링크에서 진행 가능한 하류부 링크가 하나 이상인 경우, 각 방향별 유출량은 상류부 링크의 방향별 수요에 의해 결정되며, 하류부 링크의 공급용량을 상류부 링크에 배정하는 방법은 1)유입하려는 통행수요의 크기에 비례해 결정하는 방법(김현명 외, 2001)과 2) 고정값에 의해 결정하는 방법(Adamo et al, 1999)이 있다(이와 관련된 자세한 내용은 김현명 외(2001)을 참고하기 바란다.).

기존 연구자들에 의해 지적되는 Deterministic queuing model의 가장 큰 단점은 대기행렬 교유의 교통류 특성 묘사가 어렵다는 점이다. 일반적으로 대기행렬은 차량군의 진행이 불연속적·불규칙적으로 이루어지기 때문에 불안정 교통류상태라 할 수 있다. 그러나, Deterministic queuing theory에 의한 모형들의 경우, 차량이 대기행렬에 합류하면 대기행렬은 정지선부터 최후방까지 하나의 block을 형성하고, 만약 최전방에서 10대의 차량이 유출하면 그 길이만큼 후방의 위치는 시간의 경과 없이 전진한다. 이러한 모형구조상 대기행렬 내에서 발생하는 shockwave의 묘사가 어렵고, 대기행렬이 소멸되는 방향이 현실에서는 전·후방 모두가 가능한 반면, Deterministic queuing model에서 대기행렬 소멸의 충격파는 전방으로만 전파되는 문제가 있다(Adamo et al, 1999).

### 2. Cell transmission model

Deterministic queueing model에 비해 교통류의 동적 특성변화를 보다 세밀하게 묘사할 수 있도록 개발된 모형이 Cell transmission model이다. Cell transmission model은 Daganzo(1994, 1995)에 의해 개발된 모형으로, 교통망의 링크를 한정된 수의 Cell로 분할하고 각각의 Cell내에서 거시적인 교통류 관계식을 가정하여 교통류를 Simulation하는 기법이다.



〈그림 1〉 Horizontal link model structure

이때 이용되는 교통류와 밀도간의 관계는 Newell이 제시한 Triangular formulation으로 식(1)과 같은 관계를 갖는다(Newell, 1993a; 1993b).

$$q = \min \{ v'k, q^{\max}, w(k_j - k) \},$$

$$\text{for } 0 \leq k \leq k_j \quad (1)$$

여기서,  $w$ 는 혼잡상태에서의 후방 충격파 속도를 나타낸다. 이를 도해하면 <그림 2>와 같다.

Cell transmission model에서 교통류는 이전 시간대 상류부 밀도와 하류부의 진입 교통류를, 하류부 Cell의 여유밀도 중 가장 작은 값만큼 상류부에서 하류부로 전이된다(자세한 내용은 Daganzo(1994, 1995)를 참고하기 바란다.).

링크를 주행과 대기 구간으로 구분하는 Deterministic queueing model에 비해 Cell transmission model은 링크를 보다 세분화하고, 각 Cell을 인위적으로 주행이나 대기상태로 구분하는 것이 아니라 두 특성을 모두 가질 수 있도록 모형화하였기 때문에 세밀한 교통류 묘사가 가능한 모형이다. 그러나 Cell의 특성계산을 위해 사용하고 있는 Newell의 Triangular formulation이 교통류내의 shock wave 속도를 자유주행, 정지, 대기행렬의 후방전파속도 등 3개로 간략화하여 이용하고 있기 때문에, 교통류의 연속적이고 세밀한 상태변화를 묘사하는데는 한계가 있다. Triangular formulation은 Lighthill과 Whitham이 제시한 동적 교통류 방정식의 해를 쉽게 구할 수 있도록 가감속의 영향을 소거하여 근사적인 교통량-밀도관계를 구성한 것이다. 따라서, Triangular formulation

을 이용하는 Simulation model의 경우 주행이나 대기상태에서 나타나는 전후 차량간의 영향에 의한 차량군의 가·감속변화를 묘사하는데는 한계가 있다. 또, Cell transmission model에서 하나의 Cell은 동일한 교통류 특성을 갖기 때문에, 임의로 분할되는 Cell의 크기에 따라 모형의 묘사력이 크게 영향을 받을 수 있다.

### 3. Moving segment model

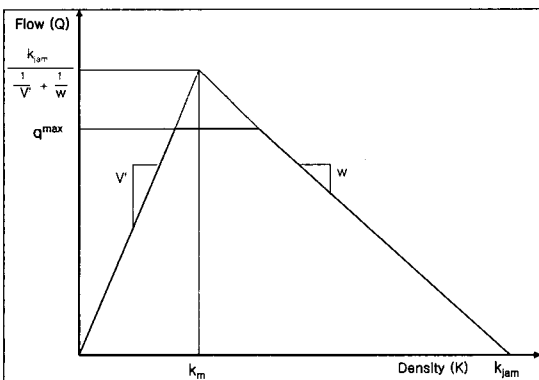
Moving Segment model은 최근 Cremer(1999) 등에 의해 제시되었다. 모형의 기본적인 형태는 유체나 기체의 확산을 모형 화하는 Lagrangian method와 분석공간을 격자로 구축하는 Fixed coordinate system을 결합한 것이다.

Moving Segment model의 기본 개념은 Cell transmission model과 반대로 Cell이 차량들을 싣고 링크를 움직이는 것이다. Cell transmission model이 고정된 Cell을 이용해 교통류를 받고, 넘겨주는 방식을 택한 반면, Cremer는 Moving Cell을 이용해 차량군의 밀도변화나 속도변화를 보다 유연하고 정밀하게 설명할 수 있음을 보였다(Cremer, 1999 등).

각 Cell에는 미리 설정된  $N$ 대의 차량이 저장되고, 링크 시점에  $N$ 대의 차량이 도착하면 1개의 Cell이 만들어진다. 각 Cell은 전, 후방 두 개의 wall들로 둘러싸여 있는데, Cell의 전방 wall의 위치는 현 시간대(interval) 직전에 출발한 Cell의 후방 wall과 일치해야 한다. Cell의 주행속도가 증가하면 Cell의 길이가 길어져 밀도는 감소하게 되고, Cell의 전방에서 감속 충격파가 전해져 Cell이 감속하게 되면 Cell의 길이가 줄어들어 밀도가 증가한다.

Cell transmission이 각 Cell간 속도나 밀도에 불연속성을 갖는 반면 Moving segment model에서는 보다 연속적으로 밀도나 속도의 전이를 설명할 수 있어 충격파와 같은 교통류의 동적 특성을 설명하는데 보다 적합한 모형이라 할 수 있다.

단, 아직은 링크주행 모형만이 개발되어 있어 합류나 분류를 처리할 수 없고, 연속된 전·후방 Cell간격 허용하지 않기 때문에 신호교차로나 제어시설이 링크 종점부에 위치하는 경우  $N$ 대를 기다리기 위해 장시간 대기하는 경우가 발생하여 동일한 Cell내의 교통류가 비 동질적인 교통류들로 형성될 수 있다는 점등의 한계점들도 가지고 있다.



<그림 2> Flow-density relationship in Cell Transmission model

### III. Simulation Based Moving Cell Model

본 연구에서는 Moving segment model과 Cell following 규칙을 이용해 Cell이 차량군(platoon)을 수송하는 새로운 모형을 제시하고자 한다. Moving Cell model이라 명명한 이 모형은 하나의 Cell이 두 개의 wall(forward wall과 backward wall)을 가지고 있으며, 각 Cell간에는 추종규칙이 적용된다. 본 연구서 제시하는 모형은 Cremer(1999)의 Moving segment model과는 달리 각 Cell간에 간격이 존재할 수 있으며, 동일한 Cell에서도 forward wall과 backward wall은 서로 다른 속도를 가질 수 있다.

#### 1. Notation

표기의 편의를 위해 링크를 나타내는  $i$ 는 생략

- $\delta$  : 분석시간대 길이(interval)
- $v^{in}$  : 링크 진입속도(km/hr), 최대값은  $V^f$  보다 작은 상수값으로 미리 설정하며, 실제 값은 링크의 상류부 Cell과 유입하려는 상류부 링크 Cell의 교통류 특성에 따라 결정
- $v^{out}$  : 링크 유출속도(km/hr), 최대값은  $V^f$  보다 작은 상수값으로 미리 설정하며, 실제 값은 하류부 링크의  $v^{in}$ 과 동일한 값으로 설정
- $v^f$  : 링크의 자유 교통류 속도(km/hr)
- $x(t)$  : 시간대  $t$ 에서 링크의 교통량(veh)
- $x^{in}(t)$  : 시간대  $t$ 에서 링크의 유입교통량(veh)
- $x^{out}(t)$  : 시간대  $t$ 에서 링크의 유출교통량(veh)
- $q^{in}$  : 링크의 유입 교통류율(veh/hr)
- $q^{out}$  : 링크의 유출 교통류율(veh/hr)
- $q^{max}$  : 링크의 최대 유출 교통류율(veh/hr)
- $X_c$  : Cell  $c$ 의 교통량(veh)
- $X_c^l$  : Cell  $c$ 의 좌회전 교통량(veh)
- $X_c^t$  : Cell  $c$ 의 직진 교통량(veh)
- $X_c^r$  : Cell  $c$ 의 우회전 교통량(veh)
- $l_c$  : Cell  $c$ 의 길이(km)
- $V_c^{ave}(t)$  : 시간대  $t$ 에서 Cell  $c$ 의 평균속도(km/hr)
- $K_c^{ave}(t)$  : 시간대  $t$ 에서 Cell  $c$ 의 평균 밀도(veh/km)

- $Q_c^{ave}(t)$  : 시간대  $t$ 에서 Cell  $c$ 의 평균 교통류율(veh/hr)
- $V_c^{fs}$  : Cell  $c$ 의 forward wall의 시간대 시작시의 속도(km/hr)
- $V_c^{fe}$  : Cell  $c$ 의 forward wall의 시간대 종료시의 속도(km/hr)
- $V_c^{bs}$  : Cell  $c$ 의 backward wall의 시간대 시작시의 속도(km/hr)
- $V_c^{be}$  : Cell  $c$ 의 backward wall의 시간대 종료시의 속도(km/hr)
- $P_c^{fs}$  : Cell  $c$ 의 forward wall의 시간대 시작시의 위치(km)
- $P_c^{fe}$  : Cell  $c$ 의 forward wall의 시간대 종료시의 위치(km)
- $P_c^{bs}$  : Cell  $c$ 의 backward wall의 시간대 시작시의 위치(km)
- $P_c^{be}$  : Cell  $c$ 의 backward wall의 시간대 종료시의 위치(km)

### 2. Flow propagation model

#### 1) Cell generation

DNL 모형에서는 각 기종점간 교통류의 크기와 경로가 알려져있다고 가정한다. 따라서, 모형내의 Cell에 대해서는 현재 주행 중인 링크 이후 Cell에 속하는 기종점 교통류가 진행할 링크를 확인할 수 있고, Cell 내에 각 회전방향별로 각각의 기종점 교통류를 나누어 저장할 수 있다. Cell 발생 단계에서 우리는 선행링크에서 전 시간대에 유출된 기종점 교통량과 링크  $i$ 를 경로의 첫 링크로 갖는 기종점 교통량의 합을 통해 링크  $i$ 의 Cell  $c$ 에 대한 각 방향별 회전교통량  $X_c^l, X_c^t, X_c^r$ 를 얻을 수 있고, 이 값들의 합  $X_c (= X_c^l + X_c^t + X_c^r)$ 가 Cell  $c$ 의 교통량이 된다.

#### 2) Cell propagation

현 시간대의 시점  $t$ 부터 종점  $t + \delta$ 까지 링크에 유입될 Cell  $c$ 의 교통량( $x^{in}(t) \cdot \delta$ ) 계산이 끝나면 우리는 발생된 Cell을 링크에 부하하여야 한다. Cell의 동적 움직임을 효과적으로 설명하기 위해 우리는 각 시간대  $t$ 별로 각 Cell에 대해 Cell의 가장 앞부분의 차량과

가장 후미의 차량의 동태를 나타내는 특성변수를 Cell의 "wall"이라는 이름으로 정의한다. 따라서, 각 Cell은 forward wall과 backward wall을 갖게 되는데 각 wall의 동적 특성치들(dynamic characteristics)의 결정과정은 이하의 설명과 같다.

본 모형에서 Cell의 forward wall과 backward는 독립적인 속도와 위치를 가진다. Cell의 상태에 따라 wall의 속도와 위치를 결정하는 방법에는 차이가 있는데, 여기서는 링크에서 Cell이 발생되는 단계부터 진행 및 유출단계까지 각각의 결정방법을 나누어 설명하도록 하겠다.

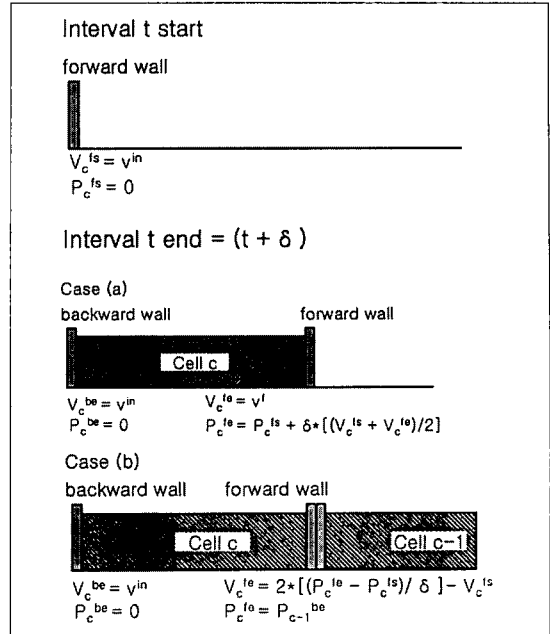
(1) Cell entering

Cell entering에서는 이미 volume이 결정된 각 Cell이 시간대의 길이( $\delta$ )동안 링크의 시점에서 시작해 어디까지 진행할 수 있는지를 결정한다. 주의할 점은 모형의 진행단계상 Cell entering은 각 시간대 링크에 존재하는 모든 Cell들의 propagation이 종료된 뒤 시행되기 때문에 현재 진입하려는 Cell을 제외한 나머지 Cell들의 특성치들은 시간대의 종점시( $t + \delta$ )의 값이라는 점이다.

<그림 3>과 같이 각 시간대에 링크에 진입하는 Cell의 경우  $V_c^{fs}$ 는 미리 설정된 링크 진입속도  $v^{in}$ 를 가지며, 이때 Cell의 forward wall의 위치  $P_c^{fs}$ 는 0으로 설정된다. Cell의 forward wall이 시간대 종료시 갖게되는 속도( $V_c^{fe}$ )와 위치( $P_c^{fe}$ )는 두 가지 경우로 나누어 결정할 수 있다. Case (a)의 경우는 현재 발생시키는 Cell이 링크가 허용하는 최대속도  $v^f$ 까지 가속하여 주행하더라도 앞 Cell(c-1)의 backward wall의 영향을 받지 않는 경우이다. 이 경우 시간대 종료시 Cell c의 forward wall의 주행속도는  $v^f$ 가 된다. Forward wall은 이 시간대 동안  $v^{in}$ 과  $v^f$ 의 평균인  $(v^{in} + v^f)/2$ 의 속도로 주행하였다고 할 수 있고, 따라서  $P_c^{fe}$ 의 값은 식(2)와 같이 계산할 수 있다.

$$P_c^{fe} = P_c^{fs} + \delta \cdot \left( \frac{V_c^{fs} + V_c^{fe}}{2} \right) \quad (2)$$

하지만 앞 Cell(c-1)의 위치에 의해 forward wall이  $v^f$ 까지 가속할 수 없는 경우가 발생할 수도 있다. 이는 Case (b)와 같은 상황이 된다. 시점 종료시 Cell



<그림 3> Wall characteristics determination in Cell entering state

c의 forward wall이 진행할 수 있는 최대 거리는 Cell c-1의 backward wall까지이고, 따라서 Cell c가 시간대 길이  $\delta$  동안 진행한 거리 ( $P_c^{fe} - P_c^{fs}$ )를  $\delta$ 로 나누면 forward wall의 시간대  $\delta$  동안의 평균 속도를 얻을 수 있다. 이 경우 평균속도와  $V_c^{fs}$ 를 이용하면 forward wall의  $V_c^{fe}$ 를 얻을 수 있다.

$$V_c^{fe} = 2 \cdot \frac{(P_c^{fe} - P_c^{fs})}{\delta} - V_c^{fs} \quad (3)$$

이와 같이 Cell의 wall에 대한 특성치들이 모두 결정되면 우리는 시간대 종료시점에서의 Cell 전체에 대한 평균적인 교통류 특성치를 얻을 수 있다. 단순한 표기를 위해 각 시간대를 나타내는 첨자  $t$ 는 생략하였다.

$$V_c^{ave} = \frac{V_c^{fe} + V_c^{be}}{2} \quad (4)$$

$$K_c^{ave} = \frac{X_c}{l_c} \quad (5)$$

$$Q_c^{ave} = K_c^{ave} \cdot V_c^{ave} \quad (6)$$

위의 계산식에서 보는바와 같이 우리는 각 Cell의 평균적인 특성치를 시간대 종료 시점( $t + \delta$ )을 기준으로 계산하였으며, forward wall과 backward wall의 특성치 사이에서 선형 근사값을 갖는다고 가정하였다. 즉, 시간대 종료시 forward wall의 속도가 100(km/hr)라 하고 backward wall의 속도가 60(km/hr)라 한다면, Cell내의 선두차량의 속도가 100(km/hr)이고 최후방 차량의 속도가 60(km/hr)라 해석할 수 있으며 Cell 앞쪽에 위치한 차량일수록 주행속도는 높은 상태라고 할 수 있다. 이러한 상태는 가속상태라 볼 수 있고 따라서 Cell의 밀도 역시 Cell 앞쪽의 차량군이 Cell 뒤쪽의 차량군에 비해 낮은 상태로 해석할 수 있다. 이렇게 Cell의 특성을 전방과 후방(forward wall과 backward wall)으로 나누어 묘사함으로써 우리는 Cell 내의 차량분포를 기존의 Cell transmission model(Daganzo, 1994; 1995)이나 Moving segment model(Cremer et al., 1999)에서 이용하는 등분포(uniform distribution)가정 대신 선형분포(linear distribution) 가정을 이용한다.

**(2) Cell running**

Cell running state에서는 각 Cell이 링크에 진입한 뒤, 전방 Cell(c-1)의 동적 특성에 따라 가속, 감속 또는 일정한 속도로 운행하는 상황을 묘사하게 된다. 이러한 기법은 일종의 Cell-following이라 부를 수 있고, 각 링크에서 Cell들의 동적 특성치들은 시간대 시작시( $t$ )와 종료시( $t + \delta$ )의 특성치를 통해 링크에서 가장 앞에 위치한 Cell부터 차례로 계산된다.

링크의 Cell propagation과정에서 중심적인 역할을 하는 running state에서 각 Cell들은 세 가지 상태 중 하나의 상태에 속하게 된다. 이 세 가지 상태는 가속, 정속, 감속 상태이다. 링크의 유출부가 신호에 의해 운영되거나 합류 등이 존재하는 일반적인 링크의 경우, 일반적인 교통류흐름을 고려하면 차량은 링크에 진입한 뒤 가속상태, 정속상태, 감속상태를 거쳐 링크에서 유출된다. 그러나 실제 차량을 이용해 주행할 경우 운전자는 링크의 중간위치에서도 가속과 감속을 반복해서 경험(Stop and go 또는 Go and stop)할 수도 있다.

그러나 일반적인 동적 통행배정 모형은 물론(Janson, 1991; Drissi et al., 1992; Jayakrishnan, 1995; Kuwahara and Akamatsu, 1997; Chen, 1999;

Li Jun et al., 2000, Sangjin Han, 2000), 교통류의 동태를 현실적으로 묘사할 수 있다는 DNL 모형의 경우에도 링크를 주행구간과 대기행렬 구간으로 구분하여 정의한다던가(Adamo et al., 1999), 교통류의 동적 특성을 단순한 backward와 forward의 충격파(shock wave)로 설명함으로써(Kuwahara and Akamatsu, 2001) 링크 내에서 불규칙적인 가·감속에 의해 발생하는 불안정 교통류 상태를 설명할 수 없었다. 이러한 문제점은 기존의 DTA모형 중 가장 정밀한 교통류 설명력을 보이는 Cell transmission에서도 적절히 설명하기 어려운 문제이다.

본 연구에서는 이러한 문제점들을 극복하기 위해 각 Cell간의 추종규칙(following rule)을 가속, 감속 상태에 따라 설정하고, 이를 통해 각 Cell의 forward wall과 backward wall을 순차적으로 추종시킴으로써, 개별 차량의 추종을 계산하지 않으면서 이와 유사한 효과를 낼 수 있도록 하였다.

Cell running state에서 가장 먼저 수행되는 작업은 Entering state와 마찬가지로 시간대 시작시 Cell forward wall의 위치( $P_c^{fs}$ )와 속도( $V_c^{fs}$ )를 결정하는 일이다. 이 과정은 Cell entering state에서와 동일한 방법을 통해 진행된다. 즉, Cell의 forward wall이 시간대 종료시( $t + \delta$ )  $v^f$ 의 속도를 가질 수 있는 경우에는 Fig. 3에서와 같이 Case (a)에 의해 그 특성치가 결정되지만, 앞 Cell의 영향으로  $v^f$ 의 속도까지 가속할 수 없거나  $v^f$ 의 속도를 유지할 수 없는 경우에는 Case (b)와 같은 방법을 통해 특성치를 결정한다.

이렇게 forward wall의 특성치 갱신이 끝나면 backward wall의 특성치를 갱신해야 한다. 앞에서 언급한바와 같이 forward wall의 속성 변화에 따라 Cell의 상태는 3가지 state로 나눌 수 있다.

즉, forward wall의 시간대 종료시 속도가 시간대 시작시의 속도에 비해 높아졌다면, 가속상태(acceleration state,  $V_c^{fs} < V_c^{fe}$ ), 낮아졌다면 감속상태(deceleration state,  $V_c^{fs} > V_c^{fe}$ ), 속도변화가 없었다면 정속상태(constant speed state,  $V_c^{fs} = V_c^{fe}$ )라 할 수 있다. 미시적인 모형과 같이 링크의 최선두(lead) 차량부터 Car following theory를 적용한다면 개별 후방차량들의 위치와 속도를 순차적으로 갱신할 수 있겠지만, 본 연구에서 구축하는 모형의 경우 최소단위가 Cell이기 때문에 Cell내 차량에 Car following theory

를 적용해 backward wall의 특성치를 갱신하기는 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 backward wall에 대해 다음과 같은 간단한 추종규칙을 설정하였다.

① Acceleration state ( $V_c^{f,e} > V_c^{f,s}$ )

Cell running state에서 이용하는 기본가정은 각 Cell wall들은 시간대 길이  $\delta$  동안 자신이 원하는 속도까지 가속할 수 있다는 것과, backward wall의 가·감속시  $V_c^{b,e}$ 의 값은 시간대 시작시( $t$ )의  $V_c^{f,s}$ 값으로 설정된다는 것이다.

첫 번째 가정의 경우 분석시간대  $\delta$ 의 크기가 매우 짧다면 비현실적이지만, 대부분의 동적 통행배정에서는 30초 이상의 단위 분석시간을 이용하기 때문에,  $\delta$  동안 정지로부터 자유 교통류 속도( $v^f$ )까지의 가속은 가능하다고 할 수 있다.

두 번째 가정은 forward wall의 동적 특성 중 속도가 단위시간  $\delta$ 가 지난 후 backward wall의 특성으로 전이된다는 것이다. 전통적인 Car following theory를 고려할 경우 두 번째 가정이 추종개념을 포함하기 위해서는 Cell내 각 차량들의 반응시간(reaction time)을 설정해야 하고, backward wall의 속도 계산을 위해서는 Cell의 길이( $l_c$ )가 고려되어야 한다. 따라서, 본 연구의 Cell wall 가정과 같이 선두 차량과 최후방 차량간의 추종관계를 전통적인 추종모형으로는 구축할 수 없다.

단, Del Castillo(1996)가 제시한 추종 모형에서는 차량간 속도관계가 다음과 같이 정의되는데( $T_n$ 은 time lag),

$$v_n(t + T_n) = v_{n-1}(t) \tag{7}$$

이 식을 이용하면 일정한 경과시간을 가지고 차량의 속도는 연속적으로 전파된다고 가정할 수 있다. 그는 식(7)과 같은 간단한 추종규칙을 이용해 Lighthill-Whitham-Richards theory에 의한 교통류의 특성을 설명할 수 있음을 보였다. 최근 Newell(2002)도 식(8)과 같은 단순 추종모형을 구축하고, 이러한 모형이 교통류의 동적 특성에 대해 우수한 설명력을 가짐을 보인바 있다.

$$P_n(t + \tau_n) = P_{n-1}(t) - d_n \tag{8}$$

여기서,

$P_n(t)$  : t시간에 n번째 차량의 위치

$\tau_n, d_n$  : n번째 차량에 대한 시간과 거리 parameter로 일종의 시공간적 time lag를 의미

위의 (8)식을 시간 t에 대해 미분하면, 우리는 식(7)과 유사한 개념의 식을 얻을 수 있다. 특히, Newell(2002)에서는 이러한 연쇄가 충분히 긴 시간동안 반복되어 일어나면서 교통류의 특성을 하류부로 전파한다고 주장하였다. 단, 식(7)이나 (8)의 경우 본 연구의 첫 번째 가정과 같이 추종차량은 자신이 원하는 속도까지 감·가속할 수 있다는 가정을 이용하였다.

이러한 추정모형들을 고려할 때, 본 연구에서 제시한 두 번째 가정은 충분한 타당성을 갖는다. Newell에 따르면 선두차량의 교통류 특성은 일정한 시간과 공간적 경과(lag)후 후방차량에서 연쇄적으로 재현되고, 이러한 현상은 충분히 긴 시간동안 유지 가능하기 때문에,  $\delta$ 라는 time lag를 고려해 forward wall이 나타내는 차량군의 선두차량과 backward wall이 나타내는 차량군의 최후방 차량이 연쇄에 따른 간접 추종관계를 형성한다고 가정할 수 있다.

다만, 식(7)이나 (8) 모두 time lag가 n번째 차량에 종속적인 parameter로 설명하였으나, 본 모형의 경우 모든 추종관계에 대해  $\delta$ 라는 값이 적용된다. 이는 모든 차량군에 대해  $\delta \approx (X_c - 1) \cdot T_{ave}$ 이라는 관계가 형성됨을 의미하기 때문에, 선택되는  $\delta$ 의 크기나 Cell내의 차량대수에 따라 적절치 못한 추종관계를 형성할 수 있다. 이 부분에 대한 연구는 본 연구의 범위를 벗어나므로 향후연구로 남겨두기로 한다.

위의 가정에 따라 forward wall이 시작 시간대( $t$ )보다 가속된 경우( $V_c^{f,e} > V_c^{f,s}$ ), 종료 시간대( $t + \delta$ ) backward wall의 속도는 시간대 시작시의  $V_c^{f,s}$ 값을 갖게된다.

주목할 점은 forward wall의 가속상태가 곧 backward wall의 가속상태는 아니라는 점이다. 예를 들어 시간대 시작시  $V_c^{f,s}$ 는 60(km/hr)이고  $V_c^{b,s}$ 가 80(km/hr)인 경우를 가정해보자. 만약 시간대 종료시  $V_c^{f,e}$ 의 값이 80(km/hr)로 가속된 경우에도  $V_c^{b,e}$ 는 60(km/hr)가 되어 결과적으로 backward wall은 감속된다. 이 경우 다음 시간대의  $V_c^{b,e}$ 는 다시 80(km/hr)의 값을 갖는다. 따라서, Cell의 forward



cell이 계속 진행중인 상황에서 backward wall은 반응시간으로 시간대 크기만큼의 값을 갖는 Car following model과 같이 움직인다. 즉, 현 시간대에는 20(km/hr)의 감속을 겪고, 다음시간대에 20(km/hr)의 가속을 경험하는 것이다.

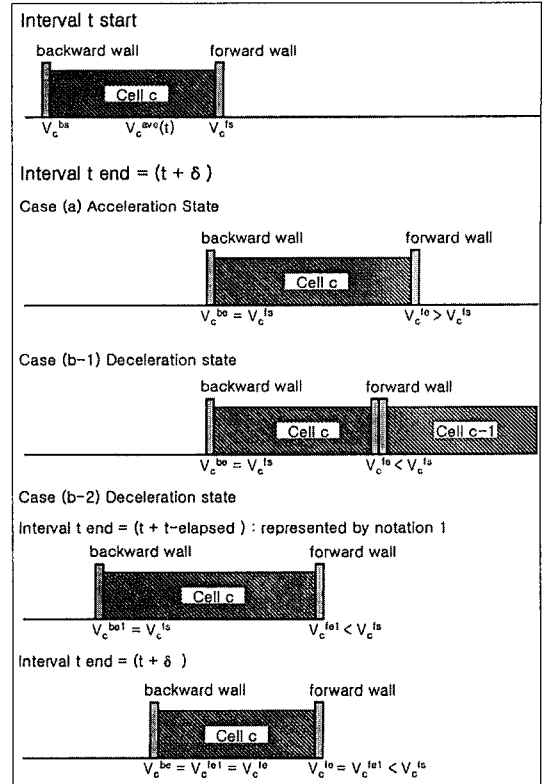
② Deceleration state ( $V_c^{f_e} < V_c^{f_s}$ )

Cell following 중에 forward wall의 감속이 발생하는 경우는 두 가지로 나눌 수 있다. 링크의 중간부분에서 앞 Cell의 감속에 의해 감속이 발생하는 경우와 링크 유출부에 도달한 경우이다. 앞 Cell의 감속에 의해 forward wall의 감속이 발생하는 경우에는 Acceleration state와 마찬가지로 가정에 따라  $V_c^{b_e}$ 는 시간대 시작시의  $V_c^{f_s}$ 의 값을 갖는다. 그러나 링크 유출부에 도달한 경우에는 <그림 4>의 Case (b-2)에서와 같이 Cell의 state를 2단계로 나누어 분석하여야 한다.

링크 유출부에서의 감속이 링크 중간부분에서의 감속과 다른 점은 forward wall의 위치가 고정된 상태에서 속도가 존재한다는 점이다. 링크 유출부에 도착한 Cell의 주행속도와 링크의 유출가능 속도에 차이가 없는 경우에는 감속이 발생하지 않지만, Cell의 주행속도에 비해 링크의 유출속도가 낮은 경우 감속이 이루어지고 대기행렬 충격파는 후방으로 전파된다. 이때 forward wall은 고정되어 있어 wall간의 거리 감소는 보다 급격하게 이루어진다.

이를 고려하기 위해 우리는 시간대  $\delta$ 내에 t-elapsed라는 내부 시간대를 추가로 고려한다. t-elapsed란 시간대의 시작부터 forward wall이 링크 유출부까지 도달하는데 소요된 시간이다. 이 시간대의  $V_c^{b_e}$ 를  $V_c^{b_e1}$ 이라 하면  $V_c^{b_e1} = V_c^{f_s}$ 의 값을 갖는다. 이 시점에서  $V_c^{f_e1} = V^{out}$ 로 설정되며, 다시 t-elapsed를 가상의 시간대의 시점으로 고려한다면,  $V_c^{f_e} = V_c^{f_e1}$ 인 정속 상태가 되어  $V_c^{b_e} = V_c^{f_e1}$ 의 상태가 된다. 물론 이 시간대 동안 차량이 움직인 거리는 t-elapsed동안은  $V_c^{b_s}$ 와  $V_c^{b_e1}$ 의 평균속도로, T-(t-elapsed)동안은  $V_c^{b_e1}$ 과  $V_c^{b_e}$ 의 평균속도로 진행한 거리로 계산된다.

유출부 감속의 경우를 제외하면 각 wall의 위치 갱신은 Cell entering 단계와 동일한 방법으로 이루어지며, Cell의 평균적인 특성치 계산도 동일한 방법을 이용한다.



<그림 4> Wall characteristics determination in Cell running state

(3) Cell exiting

링크에서 Cell의 유출은 미리 계산된 링크의 유출 용량에 의해 이루어진다. 각 링크의 유출부 속도는  $v^{out}$ 이라는 값으로 정의된다. 해당 링크가 교통망의 유출 링크(기종점 중점을 링크 중점으로 갖는 링크)인 경우, 유출부에 도착한 Cell은 진행하고자 하는 링크에 제약이 없다면, 최대 유출속도  $v^f$ 로 Cell내의 교통량  $X_c$ 을 유출시킬 수 있다. 물론 이때 링크에서 유출되는 최대 교통류율은  $q^{max}$ 로 설정되는데, 만약 유출속도  $v^{out}$ 과  $K_c^{ave}(t)$ 를 곱한 값이  $q^{max}$ 보다 작다면 유출량은  $v^{out} * K_c^{ave}(t)$ 로 결정되고, 크다면  $q^{max}$ 로 유출된다.

$$q^{out} = \min [ v^{out} * K_c^{ave}(t), q^{max} ] \tag{9}$$

위와 같이 합류나 분류가 발생하지 않는 링크에서의 유출량 계산은 매우 간단하다. 하지만 두 개 이상의 링크가 두 개 이상의 링크와 연결되는 합·분류부에서는 상류부와 하류부의 링크 특성치들이 상호 영

향을 미치면서 Cell의 유출량을 결정한다. 이에 대한 자세한 내용은 다음절에서 살펴보도록 한다.

### 3) Cell merging

본 연구에서 제시하는 합류부의 유출교통량 결정식은 교통류 기본식( $Q = K \cdot V$ )에 기반하고 있다. <그림 5>의 합류부에서 상류 링크들과 하류 링크간의 관계를 고려해보자.

위와 같은 합류부에서는 두 가지 경우를 가정할 수 있다. 첫 번째 경우는 상류부의 총 유출 교통류율이 하류부의 용량에 비해 큰 경우이고( $K_1 \cdot v_1 + K_2 \cdot v_2 > q^{\max}$ ), 두 번째 경우는 상류부의 총 유출 교통류율이 하류부 용량에 비해 작은 경우이다. 두 경우 모두 합류지점에서는 아래와 같은 식을 만족해야 한다.

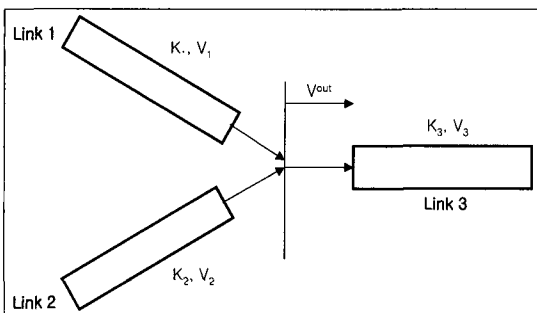
$$K_1 \cdot v_1 + K_2 \cdot v_2 = K_3 \cdot v_3 \quad (10)$$

이때 하류부 링크 3의 유입 가능 교통류율도 두 가지가 존재한다. 하류부에 진행중인 Cell이 존재하지 않거나,  $Q_3 = K_3 \cdot v_3 = q^{\max}$ 의 경우에는 하류부의 최대 유입 가능량은  $q^{\max}$ 가 되지만,  $Q_3 = K_3 \cdot v_3 < q^{\max}$ 인 경우에는 하류부 링크의 Cell 진행속도가 합류부의  $v^{out}$ 에 영향을 미치게 된다.

합류부를 지나는 교통류의 속도는  $v_1 = v_2 = v^{out}$ 이므로, 이를 식(10)에 대입해 하류부 Cell의 영향이 없는 경우에 대한  $v^{out}$ 을 계산하면 다음과 같다.

$$v^{out} = \frac{q^{\max}}{K_1 + K_2} \quad (11)$$

실제 최대 유출가능 속도가 식(11)와 같이 계산된



<그림 5> Merging Section

다 해도 상류부 Cell이 링크 진입부에서 Cell의 진행에 영향을 미친다고 가정하면  $V_3$ (링크 3의 최후방 Cell의 backward wall 속도)이상의 속도로는 진행하기 어렵다. 따라서 우리는 다음과 같은 유출속도 계산식을 이용할 수 있다. 이때  $v'$ 는 링크의 자유교통류 속도를 의미한다.

$$v^{out} = MIN \left\{ v', \frac{q^{\max}}{K_1 + K_2}, V_3 \right\} \quad (12)$$

물론 하류부의 최후방 Cell이 새로 진입하는 Cell이 자유 교통류 속도까지 가속하는데 지장을 주지 않는다면  $v^{out}$ 의 결정에서  $V_3$ 는 고려하지 않는다.

위와 같이 상류부의 유출속도가 결정되면 상류부 링크의 유출 교통류율은 아래와 같이 결정된다.

$$\text{The exit flow rate of Link 1} = K_1 \cdot v^{out}$$

$$\text{The exit flow rate of Link 2} = K_2 \cdot v^{out} \quad (13)$$

### 4) Cell diverging

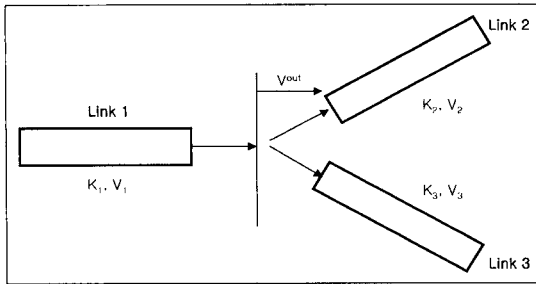
분류지점에서의 유출속도 계산도 기본적으로 합류지점에서 이용되는 기본식을 이용한다. 만약 상, 하류부의 차로수가 같거나, 하류부의  $q^{\max}$ 가 상류부에서 하류부로 진행하는 교통류율에 비해 크다면 유출속도는  $v'$ 가 된다. 하지만 상류부에서 하류부로 진행하고 자 하는 교통류율이 하류부의  $q^{\max}$ 보다 크다면 합류부와 유사한 식을 이용해야 한다.

$$v_{1-2}^{out} = MIN \left\{ v', \frac{q^{\max}}{K_{1-2}}, V_2 \right\}$$

$$v_{1-3}^{out} = MIN \left\{ v', \frac{q^{\max}}{K_{1-3}}, V_3 \right\} \quad (14)$$

여기서,  $v_{1-2}^{out}$ 이란 링크 1에서 2로 진행하는 교통류의 유출 속도이고,  $v_{1-3}^{out}$ 이란 링크 1에서 3으로 진행하는 교통류의 유출 속도를 의미한다. 이 두 속도 중 최소값이 Link 1의 유출속도  $v^{out}$ 이 된다.

이는 Cell의 FIFO(first-in-first-out) 조건과 하류부의 지체가 상류부로 전이되는 Spill-back현상을 보다 현실적으로 묘사하기 위한 목적으로 설정된 식이다. 즉, 분류부에서는 각 방향별 교통류 중 가장 저속의 방향 교통류가 링크 유출속도를 지배하게 된다.



〈그림 6〉 Diverging Section

$$v^{out} = \text{MIN} \{ v_{1-2}^{out}, v_{1-3}^{out} \} \quad (15)$$

### 3. Simulation loading algorithm

본 연구에서 각 Cell에 기종점 교통량을 부하하고 Cell을 진행시키는 작업은 실시간 흐름에 따른 부하 (loading)기법을 통해 이루어진다. 이 기법은 김현명 외 (2001)의 연구에서 설명한 SLA(Simulation Loading Algorithm)와 유사한 방법을 통해 이루어진다. 단, 이전 SLA의 경우 Horizontal queue에 따른 유입량 계산의 편의를 위해 아래와 같은 상태방정식을 이용 하였으나,

$$x(t) = x(t-1) + x^{in}(t) - x^{out}(t-1) \quad (16)$$

본 연구에서는 해당 interval 동안의 유출교통량이 다음 링크에 해당 interval에 진입하여 주행할 수 있도록 하였다.

$$x(t) = x(t-1) + x^{in}(t) - x^{out}(t) \quad (17)$$

식(17)과 같은 식의 구성은 기존의 이산시간(discrete-time) 기반 모형에서는 불가능한 것이다. 기존 이산시간 모형에서 식(17)과 같은 상태방정식을 이용해 교통량을 갱신할 경우 동일한 차량이나 platoon이 두 개의 링크에 동일한 interval에 존재하는 현상이 발생한다. 따라서 일반적인 모형들에서는 현 interval에 특정 링크에 존재하던 platoon이 유출하면 다음 interval에 다음 링크에 진입시킨다. 그러나 본 연구에서는 interval의 시점과 종점을 나누어 simulation하는 방법을 이용하여 이와 같은 문제를 해결하였다.

Moving Cell 모형의 특징은 기존의 Packet-base simulation model에서 기종점별, 경로별로 출발시간에 따라 발생된 차량군(packet)이 도착시까지 유지됨에 따라 차량군의 크기가 클 경우 교통류 묘사를 미세하게 하기가 어렵던 점을 개선해 개별 링크의 유출/유입시 새로운 차량군이 발생되도록 하였다. 따라서 각 차량군은 합류부나 분류부에서 교통류의 상태에 따라 동일한 기종점, 출발시간, 경로를 갖는 둘 이상의 차량군으로 나누어지기도 하고, 각 차량군의 교통류 상태에 따라 복수의 차량군들이 하나의 차량군으로 합쳐지기도 한다.

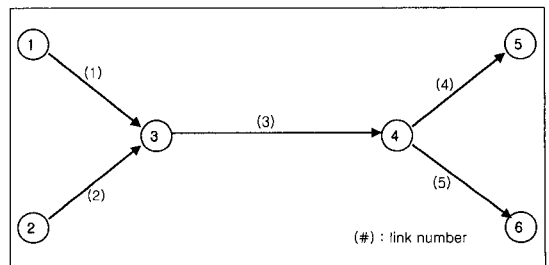
기존의 Cell transmission model 역시 임의로 설정되는 Cell의 크기에 따라 교통류 묘사의 정밀도가 종속되는 문제가 있었다. 그러나 이러한 접근법을 통해 우리는 연속성을 갖는 동적 교통류를 보다 정확히 묘사할 수 있었다.

## IV. Model Simulation Results

### 1. 입력자료

개발된 모형을 검토하기 위해 〈그림 7〉과 같은 교통망을 이용해 시뮬레이션을 실시하였다.

링크의 길이는 1,2=2,700m, 3=5,000m, 4,5=2,500m이고 각 링크는 1차로로 구성되어 있다. 링크의  $v^f$ 는 100 (km/h),  $q^{max} = 2,400$ (veh/hr)로 설정하였고 차량의 길이는 5m, 최소분석시간(interval)의 길이는 30sec으로 설정하였다. 기종점간 교통량(OD)은 미리 주어진 것으로 가정하였는데, 1-5간 수요는 시간당 2,400(veh/hr), 2-6간 수요는 시간당 1,800 (veh/hr)로서 분석 시간 초기 10분간만 차량이 진입하는 것으로 가정하였다.



〈그림 7〉 예제 가로망

## 2. Flow simulation results

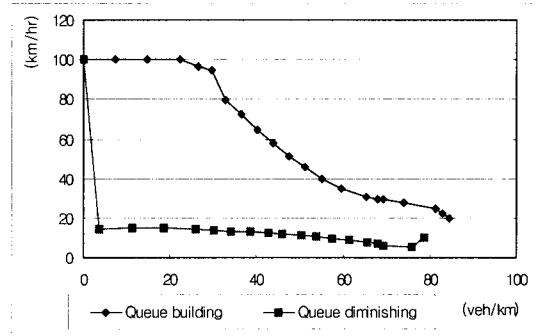
교통망의 특성상 링크 1과 2를 제외하면 운전자들은 링크상에서 거의 혼잡을 경험하지 않는다. 따라서 Simulation 결과에 대한 분석은 링크 1을 중심으로 설명하도록 하겠다.

〈그림 8〉에서는 교통류율과 밀도의 관계를 제시하였다. 대기행렬이 형성되는 구간의 경우 〈그림 2〉에서 제시한 Triangular formulation과 상당히 유사함을 알 수 있으며, 일반적인 교통류 기본식과 같이 대칭형의 구조를 갖지 않음을 알 수 있다. 링크의 자유교통류 속도와 대기행렬의 후방 전파속도가 같아야 대칭형이 나타남을 고려할 때 본 연구에서 제시한 Cell following에 의한 교통류 시뮬레이션이 타당한 결과를 나타낸다고 판단할 수 있다. Queue diminishing의 경우 교통량 유입이 끝난 시간대를 나타내므로 급격한 교통유를 저하가 나타남을 알 수 있다(물론 실제 현실상에서 유입교통량이 완전히 소멸될 수는 없으므로, 이 분석구간은 극단적인 가상상황이라 할 수 있다.). 일부 interval을 제외하면 링크 평균 교통류율은 유입/유출 최대 교통류율 2,400(veh/hr)를 크게 벗어나지 않고 있음을 알 수 있다. 일부 시간대에서 교통류율이 최대값 2,400(veh/hr)을 넘는 이유는 backward cell의 속도가 크게 줄어들지 않은 상태에서 Cell간 거리가 급격히 줄어들어 밀도가 높아졌기 때문이다. 이러한 문제는 time lag 역할을 하는  $\delta$  값을 줄이거나 새로운 추종규칙을 적용해 해결할 수 있다.

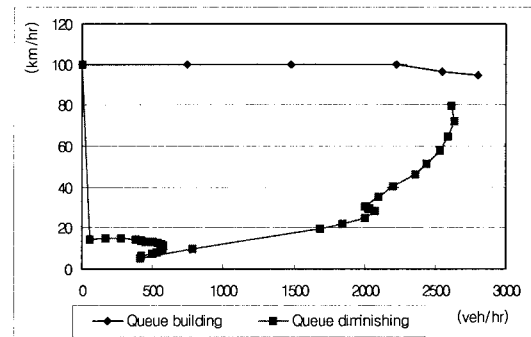
〈그림 9〉와 〈그림 10〉은 각각 속도-밀도 관계와 속도-교통류율간의 관계를 나타내고 있다. 전반적으로 속도-밀도 관계는 Queue building구간의 경우 교통류 기본식이나 현장 관측을 통해 확인할 수 있는

바와 같이 감소관계이며, 일단 대기행렬이 형성되면 밀도가 감소하더라도 링크 전체의 통행속도는 크게 향상되지 않는다. 모형에 의한 속도-교통류율의 관계 역시 일반적인 관측결과에서 나타나는 형태와 크게 다르지 않다.

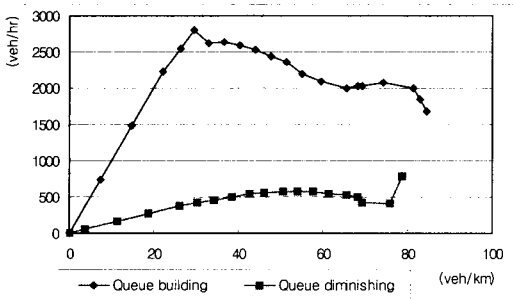
〈그림 11〉은 링크상의 주행교통량(유입-유출 교통량간 누적차)과 링크통행시간간의 관계를 나타낸 것이다. 이 관계에서는 일반적으로 후굴성, 비가역성, 다중성이 나타나는 것으로 알려져 있는데(김현명 외, 2001), 〈그림 11〉에서도 유사한 특징을 확인할 수



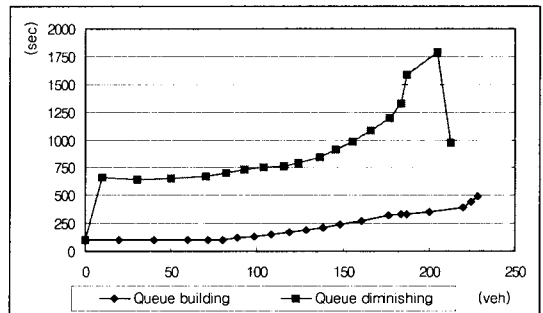
〈그림 9〉 Speed-density relationship



〈그림 10〉 Speed-flow rate relationship



〈그림 8〉 Flow rate-density relationship



〈그림 11〉 Link volume-travel time relationship

있다. 먼저 동일한 주행교통량에 대해 대기행렬 소멸 구간에서 더 높은 통행시간이 나타나며(후굴성), 혼잡증가와 감소구간에서의 주행교통량에 대한 통행시간 증/감소의 특성이 다르고(비가역성), 값이 유사한 주행교통량에서 여러 개의 통행시간이 나타난다(다중성). 위의 내용을 고려할 때 본 연구에서 개발한 Moving Cell model이 현실적인 시뮬레이션 결과를 보여준다고 판단할 수 있다.

### 3. Flow propagation by moving cell

〈그림 12〉는 링크 1의 시간대 4부터 30까지의 속도 분포를 나타낸 것이다. 속도 분포를 보면 시간대 4에서 20까지 주행속도가 20(km/h)미만인 저속구간 시점이 점차 뒤쪽으로 이동하고 있음을 볼 수 있다. 링크 유출부의 경우 첫 Cell이 링크의 유출부에도착하여 대기행렬 충격파가 발생해 후방으로 확산되는데 시간이 지남에 따라 유출지점으로부터 유출되는 속도가 후방의 Cell들로 확산되는 현상을 확인할 수 있다.

링크 유출부의 유출속도는 약 10(km/hr) 정도를 유지하며 대기행렬 소멸(또는 주행속도 증가) 현상은 정지와 주행을 반복하며 대기행렬의 후방으로 확산된다. 이러한 특성은 Deterministic queuing model이나 Cell transmission model에서는 설명하기 어려운 부분이지만, 실제 신호교차로나 링크 합류부에서는 대기차량의 주행이 진행과 정지를 반복하며 이루어진다.

유입교통량이 시간대 20까지만 존재하기 때문에 시간대 22에서는 모든 차량이 저속 주행을 하게 된다. 유출지점으로부터 두 개의 점의 각 Cell의 forward와 backward wall을 나타내며, 현재 링크 1의 경우 모든 시간대에서 c-1 Cell의 backward wall위치와 c Cell의 forward wall의 위치는 중복되어 있다.

시간대 14에서 22까지는 유출이 지속됨에 따라 유출부의 경우 오히려 10(km/hr)이상 일정한 유출속도를 갖게되고 이 값은 점차 증가하는 양상을 보인다. 이는 유출부 정지위치가 후방으로 이동하면서 유출부 통과속도가 높아지는 영향과, 수요 특성상 옆 링크의 영향으로 불규칙적이지만 링크 유출량이 늘어나는 현상이 나타나기 때문이다. 시간대 22의 경우 Cell 10과 Cell 11은 정지중이다. 시간대 6에서 최초로 정지

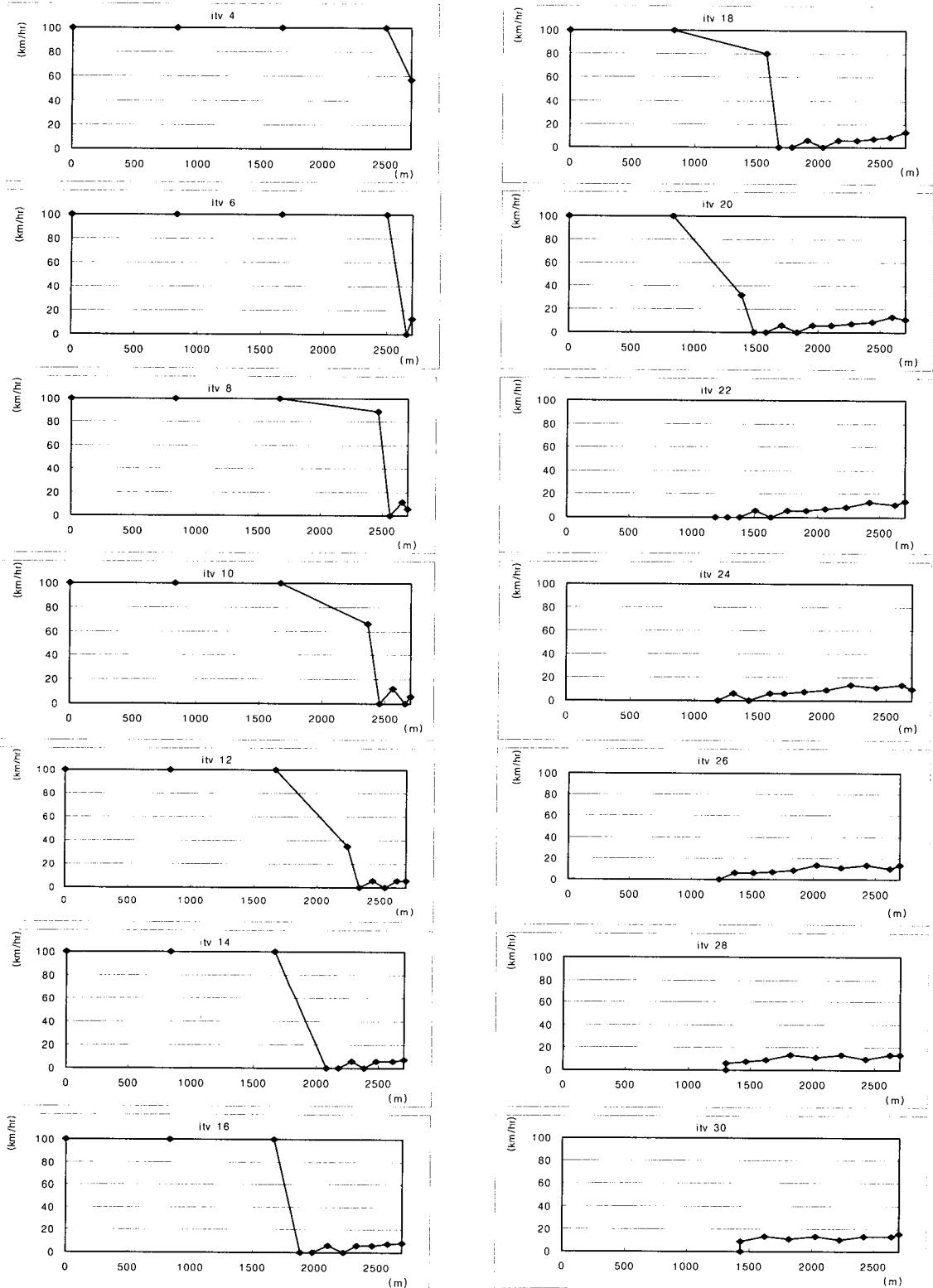
차량이 나타난 이후 정지현상은 후방으로 전이되며 주기적으로 발생하는데 이는 Cell following 규칙에 따른 현상이다. 즉, forward wall이 갑자기 감속하는 경우 backward wall을 forward wall의 감속에 순간적으로 반응하지 못하고 최대 주행거리만큼 주행한 뒤 정지해버리는 것이다.

이러한 정지와 주행의 반복현상은 interval 27이 지나면 완전히 소멸된다. 분석결과 대기행렬이 완전히 소멸되는 시간대는 27, 위치는 약 링크 기점으로부터 1250m 전방지점으로 나타났다. 중요한 사실은 분석 결과에서 알 수 있듯이 대기행렬의 소멸지점이 링크 유출부로 고정되는 것이 아니라 교통류의 상태에 따라 결정된다는 점이다. 이러한 특징과 대기행렬 내의 차량이동에서 정지와 주행이 반복해서 나타나는 점을 개별차량 기반으로 모형화 하지 않고도 재현할 수 있다는 점은 개발된 모형의 고유한 특징이라 할 수 있다.

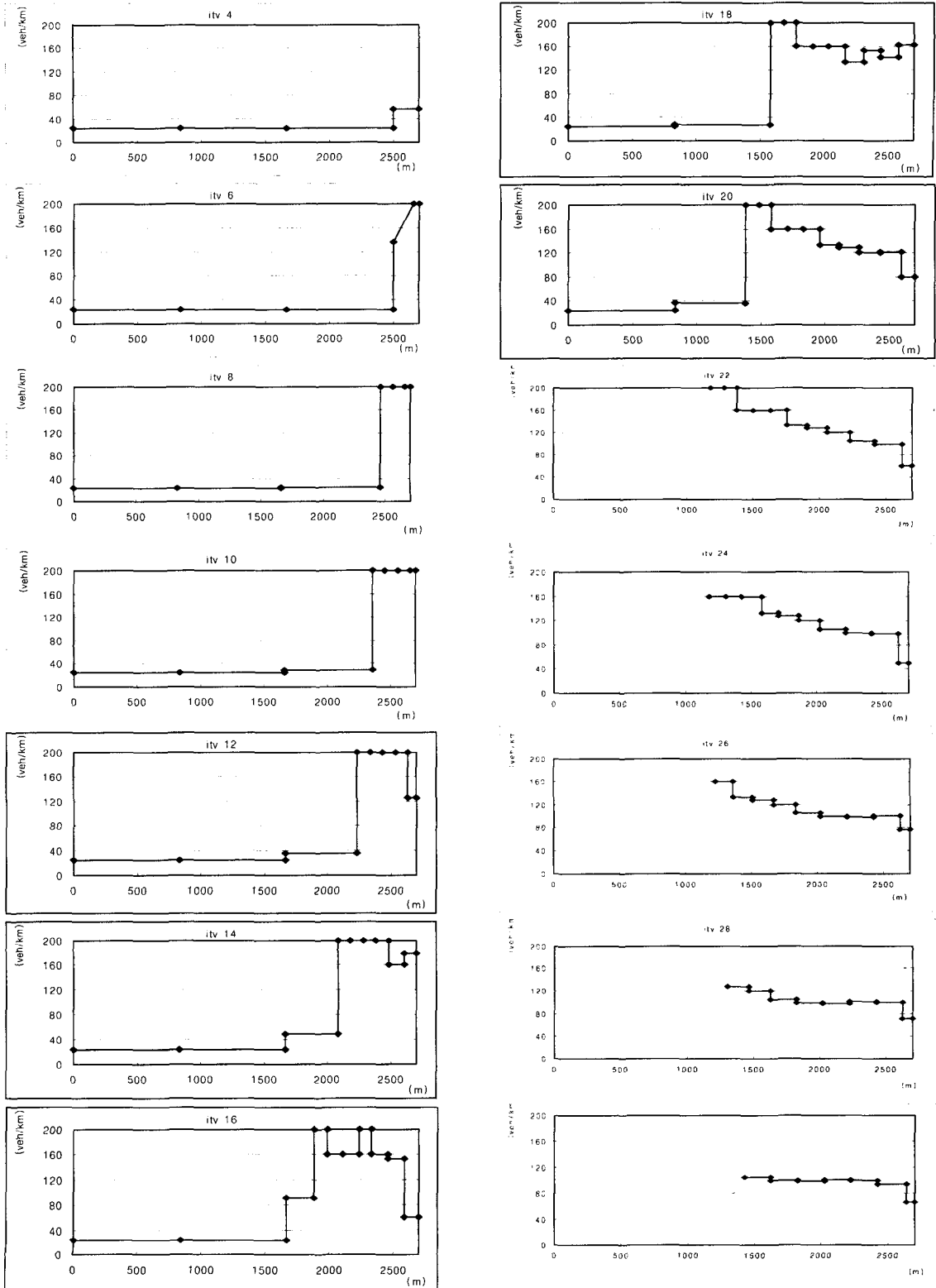
〈그림 13〉은 링크 1의 밀도분포를 나타낸 것이다. 시간대 4부터 10까지는 밀도가 200(veh/km)인 Cell이 4개까지 링크 유출부로부터 후방을 향해 누적된다. 이때 밀도가 200(veh/km)인 Cell은 wall의 속도가 0 km/hr인 경우를 의미한다. 교통류의 속도가 가장 낮은 수준으로 저하되고 밀도가 증가함에 따라 교통류는 안정적인 유출양상을 보이게 된다.

이 경우 유출부에서의 출발 가속의 영향으로 유출 중인 Cell의 경우 밀도가 낮아지는 현상이 나타난다. 시간대 12의 Cell 1은 이러한 현상을 보여주고 있다. 대기행렬은 점차 후방으로 진행되어 시간대 8에 2500m 지점을 통과하고 시간대 16에는 2000m 지점을 통과한다. 시간대 12이후부터 형성되는 대기행렬 소멸 충격파에 의해 대기행렬의 형성위치는 점차 후방으로 이동한다. 시간대 14의 경우 2200~2500m에 걸쳐 형성되던 것이, 시간대 18에는 1600~1800m 부근에서 형성된다. 또, 주행과 정지의 반복에 따라 밀도가 200(veh/km)인 대기행렬 군이 후방으로 전파되면서 와해되거나 합쳐지기도 하는데, 시간대 14~16~18에 걸쳐 나타나는 일련의 과정은 이러한 과정을 통해 대기행렬이 서서히 소멸되어감을 보여주고 있다.

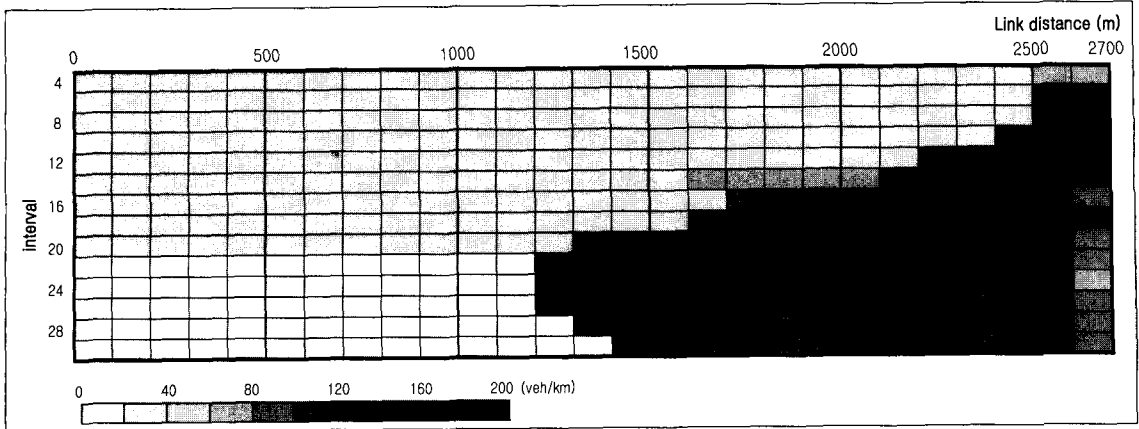
속도 분석에서 나타난 결과와 비교할 때 밀도가 200(veh/km)인 완전 정지 대기행렬이 소멸되는 시점은 시간대 23으로 나타나 차이를 보이고 있는데, 이는 속도의 경우 Forward와 Backward wall의



〈그림 12〉 Speed distribution on link 1



〈그림 13〉 Density distribution on link 1



〈그림 14〉 propagation on link 1

개별 속도값을 도해한 것이고 밀도의 경우 Cell의 평균값을 나타낸 것이기 때문이다. 따라서 속도 기준으로 보면 Cell 전·후방 wall의 주행속도가 모두 0인 마지막 시간대는 23(그림상으로는 22)이고 이때가 밀도가 200 (veh/km)인 Cell이 나타나는 마지막 시간대가 된다. 대기행렬이 소멸되는 위치는 두 분석간에 큰 차이가 나타나지 않는다.

〈그림 14〉는 시간흐름에 따른 대기행렬의 전파형태를 개략적으로 나타낸 것이다. 대기행렬 형성 초기에는 링크 유출부를 중심으로 약 300m 정도의 정지 대기행렬이 형성되었으나(interval 10), 시간이 지남에 따라 정지 대기행렬의 위치는 뒤쪽으로 이동하고, 하나의 정지 대기행렬이 두 부분으로 나누어짐을 알 수 있다. 이러한 현상은 대기행렬 내부에서 정지와 출발이 반복되면서 하나의 대기행렬이 둘 또는 그 이상의 차량군으로 분리되는 것을 보여주고 있는 것이다.

대기행렬은 후방으로 전파되면서 그 밀도가 점차 낮아지고 길이도 짧아져서 시간대 22를 지나면 정지 대기행렬은 완전히 사라진다. 하지만 시간대 18부터 24까지는 밀도가 160정도의 혼잡구간이 확산되고 줄어드는 양상을 보이는데 이는 정지 대기행렬의 혼잡이 완화되면서 혼잡구간의 범위가 일시적으로 확산되고 있음을 나타내는 것이다.

특이한 점은 혼잡이 계속되면서 유출부 부근(2600~2700m)의 경우 밀도가 낮은 상태로 안정적인 교통류 흐름을 나타내는데, 이는 안정적으로 유출용량이 공급되는 상황에서 도착하는 Cell들이 이미 감속하며 유출부로 접근하기 때문에 안정적인 교통류 흐름이 만들어진 것으로 해석할 수 있다. 하지만, 링크

의 유출부를 신호시설과 같이 처리할 경우 용량이 단속적으로 공급되기 때문에, 분석시간대 전체로는 동일한 용량이 공급되더라도 이러한 안정적인 교통류 흐름이 유지되지 않는 것을 것이다. 이러한 현상 역시 현실의 교통류 흐름을 적절히 묘사하고 있다고 생각 된다.

### V. 결론

최근 들어 발표되는 동적 통행배정 분야의 연구들의 관심은 두 부분으로 나누어져 있다. 이중 하나는 정확한 최적해 즉, 통행패턴을 계산하는 일이며 나머지 하나는 실제 교통류의 동적 특성을 모형 내에서 얼마나 현실적으로 나타낼 수 있는가 하는 점이다.

동적 통행배정문제가 갖는 두 가지 특성 즉, Non-convexity와 시간대간의 비대칭적인 영향은 앞서 제시한 두 가지 주제 중 첫 번째 문제가 수학적으로 접근할 수 없는 문제임을 나타내고 있다. 따라서, 동적 통행배정에서 전역 최적해를 얻는 문제는 확률적 최적화 과정을 통해 접근해야할 문제이다. 따라서, 알고리즘의 성능이나 효율성도 객관적인 기준을 통해 검증하는 것이 어렵다.

이에 반해 동적 통행배정 모형의 틀에서 합리적인 교통류모형을 개발하는 작업은 현실적인 자료와의 확인작업이 가능하기 때문에 보다 객관적인 평가가 가능한 부분이다. 하지만 동적모형이 갖는 중요한 문제인 모형의 복잡성 때문에 현재까지도 교통류의 다양한 동적특성을 설명할 수 있는 기법들은 제한적인 상황이다.



미시적으로 개별차량을 묘사하는 일부 모형을 제외한 대부분의 모형들이 갖는 가장 큰 문제는 대기행렬 내 차량들의 동적 진행을 설명하기 어렵다는 것이다 (Adamo et al, 1999). 하지만 Spill-back이나 Shock wave와 같이 현재 개발되는 대부분의 모형들이 다루고자 하는 문제는 대기행렬을 동질적인 밀도와 속도를 갖는 상태로 설명해서는 올바른 결과를 얻기 어렵다.

이를 위해 본 연구에서는 대기행렬내의 차량군의 움직임을 Cell을 기준으로 설명할 수 있는 Moving cell model을 개발하였다. 개발된 모형을 통해 우리는 대기행렬 내에서 주행-정지-주행을 반복하는 대기행렬을 발생시킬 수 있었고, 기존의 모형들에서 문제로 지적되어온 합류지점에서의 합리적인 분류비 계산 문제를 해결할 수 있었다. 그밖에 동일한 기종점, 경로, 출발시간을 갖는 차량군들이 주행중에 자유로이 분류와 합류를 거칠수 있도록 모형화하여 기존의 packet-based model의 한계도 극복하였다.

마지막으로 개발된 모형을 향후 실제 교통망에 적용하기 위해서는 실제 도로망에서 나타나는 운전자들의 운행특성을 각종 현장 자료를 통해 분석하여 모형내의 다양한 parameter의 값을 정산하여야 할 것이다.

**참고문헌**

1. 김종형(1999), "Cell Transmission 이론을 이용한 동적통행배정기법 개발에 관한 연구", 석사학위논문, 서울시립대학교.
2. 조중래 · 홍영석 · 손영태(2001), "기종점 기반 대규모 가로망 교통류 시뮬레이션 모형", 대한교통학회지, 제19권 제3호, 대한교통학회, pp.115~131.
3. 김현명 · 임용택 · 백승걸(2001), "시뮬레이션 부하기법을 이용한 경로기반 동적통행배정모형의 개발", 대한교통학회지, 제19권 제3호, 대한교통학회, pp.101~113.
4. Astarita V.(1996), "A continuous time link-model for dynamic network loading based on travel time function", Proceeding of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory.
5. Adamo V., Astarita V., Florian M., Mahut M., Wu J.H.(1999), "Modelling the spill-back congestion in link based dynamic network

- loading models", A simulation model with application, Proceeding of the 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory.
6. Akamatsu T.(2000), "A dynamic traffic equilibrium assignment paradox", Transportation Research B.
7. Carey M.(1986), "A constant qualification for a dynamic traffic assignment model", Transportation Science, 20, pp.55~58.
8. Carey M.(1992) "Nonconvexity of the dynamic traffic assignment problem", Transportation Research. B.
9. Chen H. K.(1999), "Dynamic travel choice models", Springer.
10. Cremer M., Stacker D. Unbehaun P.(1999), "Macroscopic modelling of traffic flow by an approach of moving segments", Proceeding of the 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory.
11. Daganzo C. F.(1994) "The cell transmission model : A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory", Transportation Research. B.
12. Daganzo C. F.(1995), "The cell transmission model", Part I and Part II, Transportation Research B.
13. Del Castillo, J. M.(1996), "A car-following model based on the Lighthill-Whitham theory", 13 ISTTT, Pergamon, New York.
14. Drissi-Kaitouni Omar, Hameda-Benchekroun Abdelhamid(1992), "A dynamic traffic assignment model and a solution algorithm", Transportation Science. 26.
15. Huang, H. J., Lam, W. H. K.(2002), "Modeling and solving the dynamic user equilibrium route and departure time choice problem in network with s", Transportation Research, 36B.
16. Janson B. N.(1991), "Dynamic traffic assignment for urban road networks", Transportation Research. 25B.

17. Jayakrishnan R., Wei K. Tsai, Anthony Chen.(1995), "A dynamic traffic assignment model with traffic-flow relationships", Transportation Research. 3C.
18. Kuwahara M., Akamatsu T.(1997), "Decomposition of the reactive dynamic assignments with s for a many-to-many origin destination pattern", Transportation Research, 31B.
19. Li Jun, Okitsugu Fujiwara, Shogo Kawakami (2000), "A reactive dynamic user equilibrium model in network with s", Transportation Research. B.
20. Lo H. K., Szeto W. Y.(2000), "Properties of a cell-based dynamic traffic assignment model", TRB anual meeting.
21. Merchant D. K. and Nemhausser G. L. (1978a), "A model and an algorithm for the dynamic traffic assignment problems", Transportation Science. 12.
22. Merchant D. K. and Nemhausser G. L. (1978b), "Optimality conditions for a dynamic traffic assignment model", Transportation Science. 12.
23. Newell, G. F.(1993a), "A simplified theory of kinematic waves in highway traffic". part 1 : General theory, Transportation Research B.
24. Newell, G. F.(1993b), "A simplified theory of kinematic waves in highway traffic". part 2: Queuing at freeway bottlenecks, Transportation Research B.
25. Newell G. F.(2002), "A simplified car-following theory : a lower order model", Transportation Research, 36B.
26. Ran B., Boyce D. E.(1996), "Modeling dynamic transportation networks", Springer.
27. Ran B., Roupail N. M., Tarko A., Boyce D. E(1997), "Toward a class of link travel time functions for dynamic assignment models on signalized networks", Transportation Research. B.
28. Sangjin Han(2000), "Dynamic Traffic assignment techniques for general road networks", University College London.
29. Sheffi Y(1985), "Urban transportation networks", MIT press.
30. Tong C. O. and Wong S. C.(2000), "A predictive dynamic traffic assignment model in congested capacity-constrained road networks", Transportation Research 34B.

✉ 주 작 성 자 : 김현명

✉ 논문투고일 : 2002. 5. 2

논문심사일 : 2002. 10. 2 (1차)

2002. 10. 9 (2차)

심사판정일 : 2002. 10. 9

✉ 반론접수기간 : 2003. 2. 28