

■ 論 文 ■

## 시뮬레이션 부하기법을 이용한 경로기반 동적통행배정모형의 개발

Path-based Dynamic User Equilibrium Assignment Model  
using Simulation Loading Method

**김 현 명**  
(주)하이콘엔지니어링  
선임연구원

**임 용 택**  
(여수대학교 교통물류  
시스템공학부 전임강사)

**백 승 길**  
(인천발전연구원  
초빙책임연구원)

### 목 차

- |   |  |
|---|--|
| <p>I. 서론</p> <p>II. 동적 통행배정모형</p> <p style="padding-left: 20px;">1. 동적 통행배정모형</p> <p style="padding-left: 20px;">2. 동적 통행배정을 위한 비용함수</p> <p>III. 경로기반 동적통행배정모형의 개발</p> <p style="padding-left: 20px;">1. 경로기반 동적 통행배정모형</p> <p style="padding-left: 20px;">2. 시뮬레이션 교통망부하기법</p> | <p style="padding-left: 20px;">3. 해석 알고리즘</p> <p>IV 모형의 평가</p> <p style="padding-left: 20px;">1. 대상가로망</p> <p style="padding-left: 20px;">2. 분석결과</p> <p>V. 결론</p> <p>참고문헌</p> |
|---|--|

Key Words : 경로기반, 동적통행배정모형, 네트워크 부하(Network loading), 수직형 대기행렬

### 요 약

지난 20여년간 연구자들이 가장 주목한 분야 중 하나가 동적 통행배정모형(Dynamic Traffic Assignment model) 분야다. 그러나 현재까지 발표된 많은 모형들은 모형의 안정적인 수렴성과 동적 통행배정모형이 갖는 많은 제약식들을 동시에 만족시키기에는 미흡한 상태였다. 이는 동적모형이 실시간 적용되기 위해서는 이용자의 경로선택문제 뿐만 아니라 각 링크의 대기행렬 길이, 통행시간, 유입·유출 교통량의 동적 변화가 교통류이론에 부합하도록 설계되어야 하기 때문이다. 이런 측면에서 기존에 주로 사용되던 링크기반(link-based)의 통행배정 알고리즘은 위와 같은 동적 특성들을 모두 만족시키기에는 한계가 있다. 링크기반모형의 경우, 각 링크에 대해 여러 제약식(flow propagation, FIFO constraint 등)들을 개별적으로 만족시켜야 하는데, 실제 이러한 작업은 모형을 매우 복잡하게 만들뿐만 아니라 실제 현실상의 교통류 특성을 비현실적으로 표현하는 결과를 낳기 때문이다.

본 연구에서는 이러한 문제를 극복하기 위하여 시뮬레이션을 이용한 경로기반(path-based) 동적 통행배정모형을 제시하고자 한다. 차량의 흐름을 좀 더 현실적으로 표현하기 위하여 개별 링크의 교통류상태를 point queue 이론으로 설명하였다. Point queue 이론은 각 링크 유출부에서의 유출교통량 및 대기시간을 전통적인 대기행렬 이론에 근거해 모형화하는 것으로 본 연구에서 실험한 결과 각 링크의 대기행렬 변화추이를 묘사하는데는 합리적인 것으로 분석되었다. 또한, 시간 종속적 기종점 교통량을 교통망에 부하기 위해 Simulation Loading Algorithm(SLA)을 개발하였다. SLA를 point queue 이론과 결합할 경우 별다른 명시적 제약없이도 앞에서 언급한 제약식들을 만족시킬 수 있으며, 동적 통행배정모형이 갖추어야 할 두 가지 필요조건, 즉 수렴성과 현실적인 교통류의 동적 변화를 묘사하는 것으로 판단되었다.

## 1. 서론

실시간 교통류의 흐름을 파악할 수 있는 동적 통행배정(Dynamic Traffic Assignment) 분야에 다양한 연구들이 최근 진행되고 있다. 많은 연구자들이 현실상의 차량 진행에서 나타나는 통행패턴과 교통류 특성을 모형으로 표현하기 위해 많은 노력을 기울여왔음에도 불구하고 아직 만족스러운 결과를 얻지 못하였다. 그동안 발표된 모형들 역시 부분적으로는 성공적이었으나, 전적으로 표준모형의 형태는 정립되지 못한 것이 현실이다. 이렇게 동적 통행배정문제에 대한 표준적인 접근법 특히, 수학적모형에 대한 표준기법이 제시되고 있지 못한 가장 큰 이유는 기본적으로 동적 통행배정문제가 비볼록성(non-convex)을 갖는다(Chen, 1999)는 것과 모형의 제약식이 많다는 것이다.

동적 통행배정모형에서 비볼록성이 발생하는 가장 큰 요인은 링크 통행시간 함수에 기인한다. 현재까지 발표된 많은 동적 통행배정모형들은 정적 통행배정모형과 마찬가지로 링크기반의 형태를 가지고 있는데, 링크기반으로 동적 교통류의 평형상태 도출을 보장하기 위해서는 정적 모형에 적용되는 필요조건뿐만 아니라 동적인 상황에서 만족되어야 하는 제약식들도 동시에 만족하여야 한다. 즉, 비분리(non-separable) 비용함수를 갖는 통행배정모형이 유일해를 갖기 위해서는 모형의 통행시간 함수가 유입교통량에 대해 단조 증가성을 가지며, 이전 시간대 유입된 교통량이 미치는 영향보다는 현재 시간대에 유입된 교통량이 미치는 영향이 더 커야 한다. 그러나, 실제 교통류와 통행시간의 관계를 고려하면 동적 통행비용함수 구성에 있어 이러한 조건을 만족시키기는 어렵다.

또한, 동적 교통류의 선입선출(First In First Out : FIFO)조건을 만족시키기 위해서는 동일한 링크에서 연속된 두 시간간격(duration) 간의 통행시간 감소폭이 모형의 최소 분석시간간격의 크기보다 커서는 안된다(Carey(1992)). 그러나, 이렇게 통행시간 증가폭을 임의로 제약하는 경우 비용함수의 강단조성이 저해되므로 모형의 수렴성이 저해되거나 목적함수의 형태가 비볼록이 될 수 있다.

여기서, 유의할 사항은 FIFO조건을 포함한 동적 모형의 여러 조건들(교통류 전파조건, 교통량보존조건, 유출용량제약조건 등)을 개별 링크에 대해 명시적으로 만족시키는 것은 대단히 어렵다는 사실이다.

특히 이러한 문제는 링크의 수가 증가할 경우 제약식의 수도 증가하기 때문에 더욱 해결하기 어렵게 된다. 이러한 측면에서, 링크기반(link-based) 알고리즘의 경우, 해당 링크로 유입되는 교통량의 출발지와 도착지 그리고 다음에 어떤 링크로 유출되어야 하는 지를 각 시간대(time interval)마다 저장해야 하는 어려움이 있다. 반면 경로기반(path-based) 알고리즘의 경우, 미리 결정된 경로에 따라 교통량을 부하(load)하게 되므로 상대적으로 계산량이 줄어들 수 있으며, 동적모형에 도입되는 제약조건들을 쉽게 만족시킬 수 있기 때문에 문제를 단순화시킬 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 위에서 기술한 제반 제약조건들을 쉽게 만족시키며 동적 이용자균형을 구현할 수 있는 경로기반의 동적 통행배정모형(Path-based Dynamic Traffic Assignment Model)을 개발하였다. 또한, 운전자의 경로선택시 사용되는 동적 통행비용을 기존 동적모형에서 흔히 사용되는 등밀도(uniform density) 가정에 기초한 전체 링크 통행시간함수(Whole link cost function) 대신, 차량의 주행과 정체를 대기행렬 이론을 이용해 표현하였다. 이를 위해 경로기반 통행배정에 적합한 시뮬레이션 부하기법(Simulation Loading Algorithm:SLA)을 제시하였는데, 이는 동적 통행비용함수에 의한 방법에 비해 차량의 움직임을 현실 교통류에 가깝게 묘사할 수 있다. SLA기법은 차량은 패킷(Packet)으로 구분하여 움직임을 표현하였으며, 대기중인 차량중 각 시간대 별로 유출가능한 차량들을 순차적으로 유출시키는 방법으로 링크를 통행하는데 필요한 시간을 계산하였다. 이를 위하여 링크를 교통상태에 따라 주행구간(running segment)과 대기구간(queueing segment)으로 구분하고, 대기구간은 수직형 대기행렬(point queue(PQ) 또는 vertical queue)로 표현하였다. 또한, SLA기법을 적용할 경우, 기존 모형(Ran et al(1996))에서 주로 사용된 일부 변수의 대각화(diagonalization) 과정을 피할 수 있다는 장점이 있다. 즉, 대각화과정을 수행할 경우 시간에 관련된 변수들은 반복계산시마다 이전 반복시의 결과와 큰 차이를 나타낼 가능성이 있는데, 이를 피할 수 있기 때문에 경사탐색방향(descend direction)의 계산이 정확하고(즉, 정확한 최단경로 탐색), 최적 이동크기(move size)도 정확히 계산할 수 있다. 개발된 모형을 예제 교통망에서 실험한 결과, 현실상의 동적 교통류, 대기행렬 묘사 등에서 만족할만한 결과를 얻

있으며, 동적 이용자 평형상태를 안정적으로 도출한다는 결론을 얻을 수 있었다.

먼저, 다음 절에서는 동적 통행배정모형에 대한 기존 연구를 간략히 살펴보고, 제3절 이하에서 본 연구에서 제시하는 모형과 이에 대한 평가결과를 살펴보고자 한다.

## II. 동적 통행배정모형

### 1. 동적 통행배정모형

정적 통행배정모형(static traffic assignment model)은 분석기간 중 교통상황에 변화가 없으며 기종점간의 통행수요가 시간의 경과에 관계없이 일정하다고 가정한다. 또한, 모든 운전자는 동일한 통행특성과 완전한 교통정보를 갖고 있다고 가정하여 통행행태를 추정한다. 그러나 이런 가정들은 시간에 따라 통행수요가 변하는 침두시간대의 교통혼잡을 모형화하는 데는 한계를 가지고 있다. 따라서 실시간으로 교통상황을 파악하고 해결할 수 있는 시간중속적인 동적 통행배정모형의 개발이 요구되어 왔다. 현재까지 개발된 동적 통행배정에 대한 연구들은 크게 아래와 같이 나누어볼 수 있다.

- ① 수리최적화 모형(mathematical programming approach)
- ② 최적제어모형(optimal control approach)
- ③ 변동부등모형(variational inequality approach :VI)

수리최적화모형은 Merchant·Nemhauser(1978a, b)에 의해 동적 통행배정 문제를 이산형 비불록 체계 최적문제(system optimization)로 구성하였다. Carey(1986)는 Merchant·Nemhauser모형을 볼록 비선형문제로 재구성할 수 있음을 보였다. 최적제어모형은 Friesz(1989), Wie(1990), Lam·Huang(1995) 등에 의해 제시된 이후, Friesz(1993) 등은 simultaneous path와 출발시간 선택을 고려하는 dynamic user equilibrium(DUE)에 대한 변동부등식으로 변화시켜 제시하였다. 이어 Wie et al(1995)은 DUE문제를 이산시간 변동부등문제(discrete time VI problem)로 구성하였으며, 링크기반 변동부등모형은 Ran(1996)

등에 의해 개발되었다.

위에서 기술된 동적 통행배정모형들에서 통행자를 교통망에 합리적으로 배정하기 위해서는 경로선택규칙이 필요하다. 잘 알려진 바와 같이 정적 모형의 경우 Wardrop의 제1규칙이 주로 경로선택규칙으로 사용되어 왔는데, 이 규칙을 통해 얻어지는 통행상태를 일반적으로 이용자균형(user equilibrium)이라 한다. 동적인 경우에도 Wardrop의 규칙을 시간에 대해 확장하여 사용할 수 있는데, 이를 동적 이용자 평형상태라 부른다. 연구자에 따라 동적 이용자 평형상태(Dynamic User Equilibrium:DUE)를 동적 이용자 최적상태(Dynamic User Optimum:DUO)로 정의하기도 하는데, 문제의 특성상 동적 문제의 경우 최적해 도출여부를 판단하기는 어려우므로, 본 연구에서는 Wardrop의 제1규칙을 동적으로 확장하여 얻어지는 상태를 동적 이용자 균형상태라 정의하며, 다음과 같이 표현한다.

- 실제시간 동적이용자 균형상태(Actual Dynamic User Equilibrium State) : 만약, 각 기종점쌍에 대해 각 시간대에 출발하는 모든 통행자들이 종점에 도착할 때까지 경험한 통행시간이 모두 같고 그 값이 최소라면, 교통망상의 동적 교통류패턴은 Actual DUE 상태이다.

동적 통행시간은 Actual(또는 predictive)과 Instantaneous(또는 reactive) 통행시간으로 나눌 수 있는데, 본 연구에서는 실제 경험하는 통행시간의 평형상태를 도출하는 모형개발이 목적이므로 Actual 통행시간에 대한 평형만을 정의하였다. 위와 같은 ADUE 상태에 대한 경로기반의 동등식은 변동부등식을 통해 아래와 같이 쓸 수 있다(Ran(1996) 등).

$$\int_0^T \sum_{rs} \sum_p \pi_{rs}^{rs*}(t) [f_{rs}^{rs}(t) - f_{rs}^{rs*}(t)] dt \geq 0 \quad (1)$$

여기서,

- $\pi_{rs}^{rs}(t)$  : 기종점 쌍  $rs$ 의 기점  $r$ 을 시간  $t$ 에 출발한 차량이 경로  $p$ 를 이용해 종점  $s$ 에 도착하는 동안 소비한 실제 통행시간
- $f_{rs}^{rs}(t)$  : 기종점 쌍  $rs$ 의 기점  $r$ 을 경로  $p$ 를 이용해 시간  $t$ 에 출발한 교통량

식(1)에서 \*는 최적 상태를 나타낸다. 식(1)은 연속 시간에 대한 모형으로 이를 이산형 모형으로 변환시키면 아래와 같다.

$$\sum_t \sum_r \sum_\beta \pi_\beta^{r*}(t) [f_\beta^{rs}(t) - f_\beta^{rs*}(t)] \geq 0 \quad (2)$$

위 변동부등식은 역시 Ran et al(1996)에 의해 링크를 기초로 한 비선형 최적화문제(nonlinear optimization problem)로 변화시킬 수 있음을 보였다.

## 2. 동적 통행배정을 위한 비용함수

동적 통행배정모형에서 사용되는 통행비용함수는 크게 전체 링크를 통행하는 교통량을 고려하는 함수(whole link travel time function)와 대기차량만을 고려하는 함수(queue delay function)로 나눌 수 있다. 전체링크 통행비용함수(Whole link function)는 정적 통행배정에서 사용되는 통행시간 함수를 기반으로 개발되었기 때문에, 전체 링크의 교통류 상태가 동질적인 상태 즉, steady state를 가정한다. 가장 대표적인 함수형태는 Jayakrishinan(1995) 등이 제안한 수정된 Greenshield 함수가 있다. 전체 링크함수에는 이 밖에도 BPR식을 동적으로 확장한 형태, Webster식을 동적으로 확장한 형태, 단순한 지수식 형태 등이 사용되어 왔다(Ran(1996), Ran(1997), Chen(1999) 등).

그러나 전체 링크함수를 동적 통행배정에 이용할 경우, 동적 통행배정 모형의 제약식들을 효과적으로 만족시키기 어렵다. 예를 들어 현재까지 제시된 식들은 대부분 유입교통량이나 링크 교통량에 대해 지수식의 형태를 갖기 때문에, 교통량이 일정 크기 이상 변화할 경우 비용함수에 의해 도출되는 통행시간이 FIFO 조건에 위배되는 경우가 발생한다. 이 밖에도 전체 링크함수로 링크의 동질성(homogeneity) 조건을 만족시키려면 각 링크와 분석시간을 최대한 작게 분할하여야 하기 때문에 실제 교통망에 적용하기에는 한계가 있다.

이러한 문제점 때문에 일부 연구자들은 전체 링크의 교통량에 대한 통행시간 함수 대신에 대기행렬 차량들만을 이용해 링크 지체시간을 계산하는 대기행렬 지체함수를 제안하였다(Drissi(1992), Kuwahara

· Akamatsu(1997), Akamatsu(2000), Li Jun(2000) 등). 대기행렬 지체함수는 PQ 이론을 이용하는 동적 통행배정 모형에서 주로 사용되는 통행시간 함수이다. PQ 이론에서는 링크상에서는 지체를 경험하지 않고 링크 유출부에서만 대기행렬에 의한 지체를 겪는다고 가정한다. 이 경우 대기행렬 지체함수는 다음과 같이 표현된다(Li Jun(2000) 등).

$$\tau_a(t) = t_a + d_a(t) \quad \forall a \in A \quad (3)$$

$$d_a(t) = \frac{q_a(t)}{v_{a, \max}} \quad \forall a \in A \quad (4)$$

식(3)에서  $\tau_a(t)$ 는 시점  $t$ 에서 링크  $a$ 의 통행시간을 나타내며,  $t_a$ 는 링크  $a$ 를 자유 교통류 속도로 통행할 때의 통행시간을,  $d_a(t)$ 는 차량지체로 인한 대기시간을 의미한다. 식(4)의  $q_a(t)$ 는 시점  $t$ 에서 링크  $a$ 의 대기행렬에 속하는 총 차량대수를 의미하고,  $v_{a, \max}$ 는 링크  $a$ 의 최대 유출교통량을 나타낸다.  $q_{a(t)}$ 의 경우  $t_a$ 가 고정값(fixed value)이기 때문에 링크 유입교통량  $u_{a(t)}$ 가 알려진 경우 쉽게 계산이 가능하다.

대기행렬 지체함수가 동적 통행배정문제에서 갖는 장점은 통행시간 함수가 갖추어야 할 조건을 만족시키는 것이 비교적 간단하다는 점이다. 즉, 통행비용중  $t_a$ 가 고정되어 있기 때문에 혼잡에 대해 통행시간이 증가하는 폭이 작고, 링크 길이와는 관계없이 합리적인 통행시간을 계산할 수 있다. 또, 전통적인 대기행렬이론을 이용하기 때문에 FIFO조건을 쉽게 만족시킬 수 있다.

그러나 여기서, 유의해야 할 점은 이런 모든 문제를 고려한 동적 통행비용함수라도 기본적으로 유일해(unique solution)를 도출하기는 어렵다는 사실이다. 이는 동적 통행시간함수의 경우 제어변수는 유입교통량  $u_{a(t)}$ 이지만 비용함수 자체는 상태 방정식에 의해 이전 시간대의 교통량과 유출교통량의 영향을 받게 되어, 동적 통행시간함수는 비가분 형태가 되며, Sheffi(1985)에 의해 제시된 통행배정 모형이 유일해를 갖기 위한 조건들을 만족시키지 못하기 때문이다. 이런 문제는 전체 링크함수나 대기행렬 지체함수 모두에서 나타나는 것으로, 이들 함수를 사용할 경우 유일해를 보장하기 어렵게 된다.

### III. 경로기반 동적 통행배정모형의 개발

링크기반 동적 통행배정 모형의 경우 문제의 구성이 대단히 명확하고 정적 통행배정 문제에서 개발된 기법들을 약간의 변형만으로 이용할 수 있다는 장점이 있으나, 여러 제약식들을 명확히 만족시키기가 어렵다는 문제가 있다. 동적 통행배정 모형은 정적 통행배정모형에 비해 시간을 추가로 고려하기 때문에 교통류 동태(dynamic behavior)에 대한 제약식들이 추가로 고려되어야 한다. 동적 통행배정모형에서 일반적으로 고려되는 제약식으로는 상태방정식, 교통류 전파제약, FIFO 제약, 링크 용량제약, 교통류 보존 제약, 비음제약, 정의제약(definitional constraints) 등이 있다. 그러나 일부 제약식들은 통행배정문제를 비볼록하게 만들기 때문에 전통적인 최적화 알고리즘을 적용하기 힘들고 경우에 따라서는 최적해 도출이 어렵다.

그러나 경로기반의 통행배정 모형은 목적함수 계산시 각 기종점간 경로의 통행시간과 경로통행량만을 고려하면 되고, 경로 통행시간과 경로 통행량간의 관계는 링크 통행시간과 링크 교통량에 비해 단조성을 갖도록 설계가 용이하다는 장점을 갖는다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 문제들을 최소화 할 수 있도록 경로기반 동행배정모형을 제시한다. 이하 내용에서는 본 연구에서 제시하는 경로기반의 동적 이용자평형 통행배정 모형과 이에 부과되는 제약조건들을 살펴보고, 경로 통행배정 과정에서 이용할 수 있도록 본 연구에서 개발한 시뮬레이션 부하 알고리즘(Simulation loading algorithm:SLA)과 전체 알고리즘에 대하여 설명한다.

#### 1. 경로기반 동적 통행배정모형

본 연구에서는 아래와 같은 목적함수를 이용하였다.

$$Min \sum_r \sum_s \sum_p \pi_p^{rs}(t) [f_p^{rs}(t) - f_p^{rs*}(t)] \quad (5)$$

일부 연구의 경우(Janson(1991), Jayakrishinan et al(1995), Chen et al(2000)) Beckmann의 동등 최소화문제(equivalent minimization problem)를 단순히 동적으로 확장한 목적함수를 제시하였으나, 최근 Lo(2000) 등의 연구결과나 본 연구의 실험 결과 이러한 목적함수로는 동적 이용자 균형상태를

도출할 수 없고 수학적으로도 평형조건외의 도출이 불가능하다는 것이 확인되었다.

다음은 식(5)에 부과될 제약식들을 살펴보자. 본 연구에서는 링크를 교통상태에 따라 주행구간(running segment)과 대기구간(queueing segment)으로 나누는데, 부과되는 제약조건식들도 주행구간과 대기구간으로 구분되어 표현된다. 주행구간은 해당 링크에 진입한 차량이 지체없이 링크를 주행하는 구간이며, 대기구간은 주행한 차량이 하위교차로 앞에서 유출용량의 제한으로 대기시간을 겪는 구간이다. 본 연구에서 대기차량은 물리적인, 즉 수평적인 대기(Horizontal queues)가 아니라, 수직적인 대기(Point queues 또는 Vertical queues)를 가정한다.

#### 1) 상태방정식(State equation)

동적 통행배정 모형에서 사용하는 상태방정식은 일반적으로 유입교통량을 제어변수(control variable)로, 링크 교통량과 유출교통량을 상태변수(state variable)로 사용한다. 본 연구에서는 상태변수인 링크 교통량에 대한 상태방정식을 주행구간과 대기구간으로 구분하여 다음과 같이 이산형으로 표현한다.

$$xr_{ap}^{rs}(t) = xr_{ap}^{rs}(t-1) + ur_{ap}^{rs}(t) - vr_{ap}^{rs}(t-1) \quad \forall a, p, r, s \quad (6)$$

$$xa_{ap}^{rs}(t) = xa_{ap}^{rs}(t-1) + ua_{ap}^{rs}(t) - va_{ap}^{rs}(t-1) \quad \forall a, p, r, s \quad (7)$$

여기서,  $ur_{ap}^{rs}(t)$ ,  $vr_{ap}^{rs}(t)$ ,  $xr_{ap}^{rs}(t)$ 는  $t$ 시점에서 기종점  $rs$ 간 경로  $p$ 의 링크  $a$ 에 속한 주행구간에 유입하는 교통량, 유출하는 교통량 그리고 링크상 존재하는 교통량을 각각 나타낸다.  $xa_{ap}^{rs}(t)$ ,  $ua_{ap}^{rs}(t)$ ,  $va_{ap}^{rs}(t)$  역시 동일하게 정의되는 데, 각각 대기구간에서의 유입, 유출 그리고 존재 교통량을 나타낸다.

#### 2) 교통류 전파제약(flow propagation constraints)

교통류 전파제약식이란 링크내에서 특정 시간대 유입된 교통류와 통행시간, 유출교통량간의 관계를 정의하는 제약식으로 다음과 같이 표현된다.

$$ur_{ap}^{rs}(t) = vr_{ap}^{rs}(t + t_a(t)) \quad \forall a, p, r, s \quad (8)$$

$$uq_{ap}^{rs}(t) = vq_{ap}^{rs}(t + d_a(t)) \quad \forall a, p, r, s \quad (9)$$

여기서,  $t_a(t)$ 는  $t$ 시점에 유입한 차량이 링크 주행구간을 통행하는 통행시간을 나타내며,  $d_a(t)$ 는 대기 구간에서 지체하는 시간을 의미한다. 이들 교통류 전파조건은 단순히 각 시간대별로 유입된 교통류는 자신이 유입된 시간대의 링크 통행시간이 지난 뒤 유출한다는 조건을 의미하는 것일 뿐 FIFO 조건을 보장할 수 있는 것은 아니다.

**3) 선입선출제약(FIFO constraints)**

동적 통행배정 모형에서 가장 많은 문제를 일으키는 제약이 FIFO 제약식다. FIFO조건은 실제 교통망상에서 엄밀히 지켜지지 않으며, 수학적 구성식에서 실행가능영역을 비불록하게 만드는 성질이 있다. 따라서, Carey(1992)는 FIFO 조건을 명시적으로 부과하지 않고 문제를 푼 뒤 결과를 해석하는 과정에서 FIFO 조건을 검토하는 것이 바람직할 수도 있음을 밝힌 바 있다. 그러나 합리적인 교통류의 진행을 위해서는 FIFO조건이 필요하기 때문에 동적 통행배정 모형에서는 일반적으로 이를 제약조건에 포함시키고 있다. 본 연구에서는 Ran et al(1996)이 제시한 다음과 같은 FIFO 조건을 적용한다.

$$\dot{\tau}_a(t) > -1 \quad (10)$$

여기서,  $\dot{\tau}_a(t)$ 는 시점  $t$ 에서 링크  $a'$ 를 통행하는 통행시간의 미분값(Derivative)이다.

**4) 최대 링크유출용량제약(Maximum exit flow from link)**

링크의 최대 유출차량수는 신호교차로나 도로의 물리적 특성에 의해 제약된다. 본 연구에서는 대기구간에서 차량이 다음 링크로 유출되므로, 식(11a)와 같이 유출용량제약을 갖는다.

$$vq_{ap}^{rs}(t) \leq vq_{a, \max}(t) \quad \forall a, t \quad (11a)$$

여기서,  $vq_{a, \max}(t)$ 는 시점  $t$ 에서 유출되는 최대 교통량을 나타낸다. 그러나, 최대 유출교통량을 교통망 상태에 따른 변수나 함수로 설정할 경우, 동적 통행배정문제가 비불록해질 수 있기 때문에 본 연구에서는

식(11b)와 같이 고정된 값을 사용하였다.

$$vq_{ap}^{rs}(t) \leq vq_{a, \max} \quad \forall a, t \quad (11b)$$

**5) 기타 제약조건(other constraints)**

위에서 제시한 제약식 외에도 동적 통행배정 모형에서 고려해야할 제약식들은 다음과 같다.

**① 교통량 보존제약(Flow conservation constraints)**

$$f^{rs}(t) = \sum_{a \in A(r)} \sum_p ur_{ap}^{rs}(t) \quad \forall r, s \quad (12)$$

$$\sum_{a \in B(j)} vq_{ap}^{rs}(t) = \sum_{a \in A(j)} ur_{ap}^{rs}(t), \quad uq_{ap}^{rs}(t) = vr_{ap}^{rs}(t) \quad \forall a, p, r, s : j \neq r, s \quad (13)$$

여기서,  $f^{rs}(t)$ 는 기종점  $rs$ 를 통행하는 경로교통량 중 시점  $t$ 에 기점  $r$ 을 출발한 차량수를 나타내며,  $A(j)$ ,  $B(j)$ 는 각각 노드  $j$ 를 기점과 종점으로 갖는 링크 집합을 의미한다.

**② 비음제약(nonnegativity constraints)**

$$\begin{aligned} xr_{ap}^{rs}(t) &\geq 0, \quad ur_{ap}^{rs}(t) \geq 0, \quad vr_{ap}^{rs}(t) \geq 0, \\ f_p^{rs}(t) &\geq 0 \quad \forall a, p, r, s \\ xq_{ap}^{rs}(t) &\geq 0, \quad uq_{ap}^{rs}(t) \geq 0, \quad vq_{ap}^{rs}(t) \geq 0 \end{aligned} \quad (14)$$

**③ 정의적인 제약(definitional constraints)**

$$\begin{aligned} \sum_{rs} ur_{ap}^{rs}(t) &= ur_a(t), \quad \sum_{rs} vq_{ap}^{rs}(t) = vq_a(t) \\ \sum_{rs} xr_{ap}^{rs}(t) &= xr_a(t), \quad \sum_{rs} xq_{ap}^{rs}(t) = xq_a(t) \quad \forall a \end{aligned} \quad (15)$$

**④ 초기조건(Initial condition)**

$$\begin{aligned} xr_{ap}^{rs}(0) &= 0, \quad vr_{ap}^{rs}(0) = 0, \quad xq_{ap}^{rs}(0) = 0, \\ vq_{ap}^{rs}(0) &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

위 제약조건에서 살펴본 바와 같이 본 연구의 특징은 기존 연구와는 달리 링크를 2개의 부분으로 나누어 교통류를 설명한다는 점이다. 즉, 링크의 상태를 주행상태와 대기상태로 구분하고 각각의 상태에 대해 독립적인 상태방정식과 교통류 전파조건들을 적용하기 때문에 링크를 단일상태(steady state)로 정의하

는 모형들에 비해 현실적인 교통류 묘사가 가능하게 된다.

## 2. 시뮬레이션 교통망부하기법(SLA)

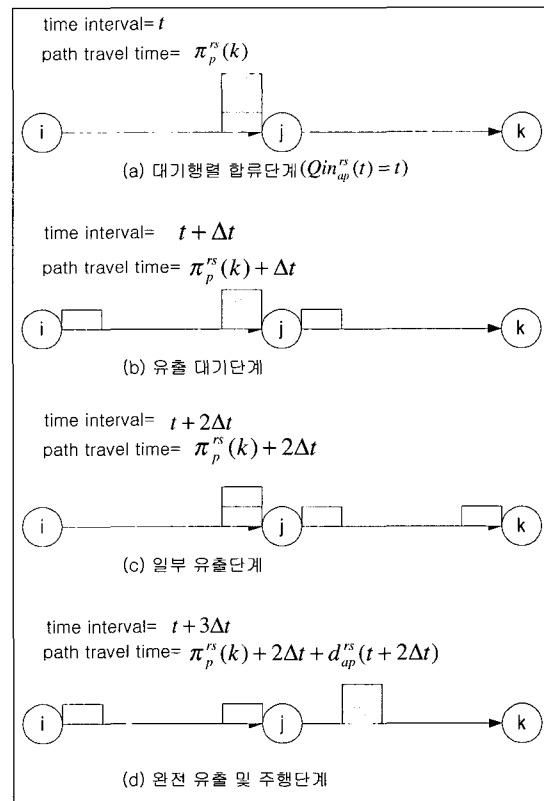
본 연구에서는 경로 교통류의 동적 이동상황을 현실적으로 묘사하기 위해 Simulation Loading Algorithm(SLA)을 개발하였다. SLA의 기본구조는 대기행렬이론과 PQ 이론 및 시뮬레이션 모형을 결합한 것이다. SLA에서는 각 OD의 경로 교통량에 대한 통행시간을 식(3), 식(4)와 같이 링크에 대해 정의된 수학적 지체식으로 계산하지 않고 시간의 흐름에 따른 시뮬레이션을 통해 계산한다. 교통류의 움직임과 통행시간은 <그림 1>과 같은 과정을 따라 결정된다.

<그림 1>의 (a)는 링크에 진입한 차량이 자유 통행속도로 링크를 주행한 후,  $j$  노드 앞에서  $t$  시점에 대기차량에 기존 차량에 수직형태로 합류하는 단계를 나타내고 있으며, 이때 기점에서 합류사까지의 경로 통행시간이  $\pi_p^{rs}(k)$ 이다. 여기서, 대기행렬에 합류하는 시점을  $Q in_{ap}^{rs}(t)$ 로 표시하였다. <그림 1(b)>는  $\Delta t$  시간 경과 후, 기존 차량이 다음 링크로 유출하는 과정을 보여주고 있으며, <그림 1(c)>는 해당 차량군의 일부만 다음 링크로 유출하는 단계이며, <그림 1(d)>는 나머지 차량이 완전히 유출된 후 다음 링크구간을 주행하는 단계를 표현하고 있다. 차량의 이런 움직임을 알고리즘으로 표현하면,  $t=0$ 부터  $t=T$ 까지  $t$ 를 증가 시켜가면서 각 시간대별로 각 OD의 경로 교통류의 위치를 시뮬레이션하게 된다. 이 과정을 통하여  $ur_{ap}^{rs}(t)$ ,  $vr_{ap}^{rs}(t)$ ,  $xr_{ap}^{rs}(t)$ 와  $xq_{ap}^{rs}(t)$ ,  $uq_{ap}^{rs}(t)$ ,  $vq_{ap}^{rs}(t)$  및 각 변수들의 auxiliary 값들이 결정된다. SLA의 계산과정은 다음과 같다.

### [Step 1] Initialization

#### (1.1) 초기값 설정

- Time interval  $t=1$
- $ur_{ap}^{rs}(t)$ ,  $vr_{ap}^{rs}(t)$ ,  $xr_{ap}^{rs}(t)$ ,  $xq_{ap}^{rs}(t)$ ,  $uq_{ap}^{rs}(t)$ ,  $vq_{ap}^{rs}(t)=0$ ,  $d_{ap}^{rs}(t)=0$
- $v_{a, \max}(t)$  값 설정
- 시점  $k$ 에서 출발하는 경로별 경로교통량  $f_p^{rs}(k)$  (외부에서 주어짐)
- $\pi_p^{rs}(k)=0$



<그림 1> 시뮬레이션 부하과정(SLA)

- (1.2) 경로교통량  $f_p^{rs}(k)$ 를 교통망에 부하(loading) 하고,  $ur_{ap}^{rs}(t)$ 를 계산.

### [Step 2] Queue inflow calculation

- (2.1) 식(6)을 이용하여  $xr_{ap}^{rs}(t)$  계산
- (2.2) 각  $f_p^{rs}(k)$ 에 대해 각 링크의 중점노드에 도착하는 시간, 즉 대기행렬에 진입하는 시간 [ $Q in_{ap}^{rs}(t)$ ] 계산.
- ① 주행구간의 링크 통행시간  $t_a$  계산
  - ②  $Q in_{ap}^{rs}(t) = \pi_p^{rs}(k) + t_a$
- (2.3) 경로 통행시간 갱신
- $$\pi_p^{rs}(k) = \pi_p^{rs}(k) + t_a$$

### [Step 3] Queue calculation

- (3.1) 만약  $Q in_{ap}^{rs}(t) = t$ 이면,  $uq_{ap}^{rs}(t) = uq_{ap}^{rs}(t) + f_p^{rs}(k)$
- (3.2) 식(7)을 이용하여  $xq_{ap}^{rs}(t)$  갱신
- (3.3) 식(19)로  $vq_{ap}^{rs}(t)$  계산

(3.4) 만약,  $vq_{ap}^{rs}(t) < vq_{a,\max}(t)$ 이면,  $vq_{ap}^{rs}(t)$ 를 다음 링크  $b$ 로 유출하고  $(t+1)$ 시간대에 대기행렬에 합류한  $uq_{ap}^{rs}(t+1)$ 에 대해서 (Step3)의 과정을 반복

[Step 4] Queue & Link exit flow calculation

(4.1)  $vq_{ap}^{rs}(t)$ 계산

(4.2) 경로통행시간[  $\pi_p^{rs}(k)$  ]계산.

①  $vq_{ap}^{rs}(t)$ 가 유출되지 못하는 경우,

$$\pi_p^{rs}(k) = \pi_p^{rs}(k) + \Delta t$$

②  $vq_{ap}^{rs}(t)$ 가 유출하는 경우,

$$\pi_p^{rs}(k) = \pi_p^{rs}(k) + d_{ap}^{rs}(k)$$

여기서,  $d_{ap}^{rs}(t) = \frac{\sum_t vq_{ap}^{rs}(t)}{vq_{a,\max}(t)}$

[Step 5] Link inflow calculation

(5.1)  $vq_{ap}^{rs}(t)$ 에 대해 경로  $p$ 상의 다음 링크  $b$ 로 유입시켜  $ur_{bp}^{rs}(t)$ 계산.

(5.2) 링크  $b$ 의 기점이 종점인 경우,  $ur_{bp}^{rs}(t) = 0$  : 경로  $p$ 의 시뮬레이션 종료.

(5.3)  $t = T$ (분석 최종시간)인 경우 또는 더 이상 진입교통량  $ur_{ap}^{rs}(t)$ 가 없는 경우, 시뮬레이션 종료. 그렇지않으면,  $t=t+1$ 로 설정한 뒤(Step 2)로 진행.

이미 설명한 바와 같이 SLA는 기본적으로는 기존에 제시된 차량군 시뮬레이션모형을 단순화시킨 것이다. 이 기법을 이용할 경우 각 경로 교통량  $f_p^{rs}(t)$ 가 각 시간대별로 최대로 경험할 수 있는 지체의 크기가  $\Delta t$ 가 되기 때문에 FIFO 조건을 위배하지 않게 되며,  $\tau_a(t)$ 를 예측하여 경로교통류를 유출시키는 것이 아니라 대기행렬에 합류한 시간( $Q in_p^{rs}$ )에 따라 순차적으로 유출시키므로 교통류 전파조건도 자동적으로 만족된다.

(Step 3.3)에서 각 종점  $s$ 로 향하는 최대 유출을 계산은 PQ 이론에서 사용하는 기본식을 변형하여 사용하였다. 이 식은 Jun Li 등(2000)에서 아래와 같은 형태로 제시되었으며 FIFO조건을 만족한다.

[유출량 계산(Exit flow calculation)]

$$\frac{v_a^s(t + \tau_a(t))}{v_a(t + \tau_a(t))} = \frac{u_a^s(t)}{u_a(t)} \tag{17}$$

따라서, 종점  $s$ 로 진행하는 교통류의 유출율은 식(18)과 같이 계산된다.

$$v_a^s(t + \tau_a(t)) = \frac{u_a^s(t)}{u_a(t)} v_a(t + \tau_a(t)) \quad \forall a, s \tag{18}$$

본 연구에서는 식(18)을 아래 식(19)와 같이 변형하였다.

$$vq_{ap}^{rs}(t + d_{ap}^{rs}(t)) = \frac{uq_{ap}^{rs}(t)}{uq_a(t)} vq_{a,\max}(t + d_{ap}^{rs}(t)) \quad \forall a, r, s \tag{19}$$

식(19)에서  $uq_a(t)$ 는 각 시간대별로  $uq_a = \sum_{rs} uq_{ap}^{rs}(t)$ 를 합하여 계산하면 된다. 물론 현재의 알고리즘에서 식(18)과 식(19)는 완전히 동일한 의미를 갖지만, 향후  $t_a$ 의 값이 상수로 가정되지 않는 경우에는 다른 의미를 가질 수 있다. 식(19)는 대기중이 아니라 주행중에는 추월이 가능하지만 일단 대기행렬에 합류할 경우에만 유출시 추월이 불가능하도록 함으로서 FIFO 조건을 현실적으로 완화하는데 도움을 줄 수 있다. 식(19)에서  $vq_{ap}^{rs}(t)$ 가  $vq_{a,\max}(t)$ 에 비해 작은 경우에는 대기중인 다음 순서의 경로교통류가 식(19)로 유출비율이 계산된 후 유출된다.

본 연구에서는 시뮬레이션 기법을 통해 교통류를 진행시키고 유출시키기 때문에 링크에 유입하는 시점에서 링크의 유출시간을 결정하지는 않는다. 따라서, 본 연구기법을 유고상황이나 교통 대응적인 신호제어 모형을 고려한 동적 통행배정 모형에 적용할 경우, 보다 현실적인 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

3. 해석 알고리즘(Solution algorithm)

본 연구 전체적인 풀이 알고리즘은 다음과 같다. 목적함수는 식(20)과 같은 Gap함수를 사용한다.

$$Gap = \sum_t \sum_{rs} \sum_p \pi_p^{rs*}(t) [f_p^{rs}(t) - f_p^{rs*}] \tag{20}$$



Gap값을 구하기 위해서 1차원 탐색법(One dimension searching method)인 Golden section 기법을 사용하였으며, 교통류 상태는 앞에서 기술한 SLA을 사용하였다.

**[Step 1] Initialization**

- (1.1) Set initial values, Outer iteration number  $n=0$   
 $ur_{ap}^{rs,n}(t), vr_{ap}^{rs,n}(t), xr_{ap}^{rs,n}(t), uq_{ap}^{rs,n}(t), vq_{ap}^{rs,n}(t),$   
 $xq_{ap}^{rs,n}(t), f_p^{rs,n}(t)=0$   
 $\tau_a^n(t), \tau_{ap}^{rs,n}(t), d_a^n(t), d_{ap}^{rs,n}(t), \pi_p^{rs,n}(t)=0$   
 $\forall r, s, a, p, t$
- (1.2) Calculates initial link travel time  $t_a$  and set  $\tau_a^n(t) = t_a$
- (1.3) For each origin-destination pairs, searches dynamic shortest paths based on  $\{\tau_a^n(t)\}$
- (1.4) Loads each O-D trips on the dynamic shortest paths and yields path flow  $\{f_p^{rs,n}(t)\}$
- (1.5) Loads  $\{f_p^{rs,n}(t)\}$  on the network and calculates  $\{ur_{ap}^{rs,n}(t), vr_{ap}^{rs,n}(t), xr_{ap}^{rs,n}(t), uq_{ap}^{rs,n}(t), vq_{ap}^{rs,n}(t), xq_{ap}^{rs,n}(t), \tau_{ap}^{rs,n}(t), d_{ap}^{rs,n}(t), \pi_p^{rs,n}(t)\}$  with SLA

**[Step 2] Convex-combination**

- (2.1) Searches dynamic shortest paths based on  $\{\tau_a^n(t)\}$
- (2.2) Loads each O-D trips on the dynamic shortest paths and yields auxiliary path flow  $\{y_p^{rs,n}(t)\}$
- (2.3) Determines optimal move size ( $\lambda^n$ )
  - (2.3.0) Initialization  
 Inner iteration number  $k=0$   
 $a^k=0, b^k=1$   
 $r=0.618$   
 Convergence tolerance  $\epsilon$
  - (2.3.1) Calculates  $X_L^k, X_R^k$   
 $X_L^k = a^k + (b^k - a^k) * (1 - r)$   
 $X_R^k = a^k + (b^k - a^k) * r$
  - (2.3.2) Calculates two new path flows,

$$F_{L,p}^k(t) = f_p^{rs,k}(t) + X_L^k \cdot (y_p^{rs,k}(t) - f_p^{rs,k}(t))$$

$$F_{R,p}^k(t) = f_p^{rs,k}(t) + X_R^k \cdot (y_p^{rs,k}(t) - f_p^{rs,k}(t))$$

- (2.3.3) Based on  $\{F_L^k(t), F_R^k(t)\}$ , calculates two kinds of new path costs  $\{\pi_{L,p}^{rs,k}(t), \pi_{R,p}^{rs,k}(t)\}$  with SLA

- (2.3.4) Calculate two Gap values,

$$Gap_L(t) = \sum_t \sum_{rs} \sum_p \pi_{L,p}^{rs,k}(t) [F_{L,p}^{rs,k}(t) - f_p^{rs,k}]$$

$$Gap_R(t) = \sum_t \sum_{rs} \sum_p \pi_{R,p}^{rs,k}(t) [F_{R,p}^{rs,k}(t) - f_p^{rs,k}]$$

- (2.3.5) Convergence test

If  $abs(b^k - a^k) < \epsilon, \lambda^n = \frac{X_L^k + X_R^k}{2}$  and proceeds to (2.4)

Otherwise, go to (2.3.6)

- (2.3.6) If  $Gap_L(t) > Gap_R(t), a^k = X_L^k$

Otherwise,  $b^k = X_R^k$

$k = k + 1$  and go to (2.3.1)

- (2.4) Updates path flows,

$$f_p^{rs,n+1}(t) = f_p^{rs,n}(t) + \lambda^n (y_p^{rs,n}(t) - f_p^{rs,n}(t))$$

$$\forall p, t$$

- (2.5) Loads  $\{f_p^{rs,n+1}(t)\}$  on the network and

calculates  $\{ur_{ap}^{rs,n+1}(t), vr_{ap}^{rs,n+1}(t), xr_{ap}^{rs,n+1}(t), uq_{ap}^{rs,n+1}(t), vq_{ap}^{rs,n+1}(t), xq_{ap}^{rs,n+1}(t), \tau_{ap}^{rs,n+1}(t), d_{ap}^{rs,n+1}(t), \pi_p^{rs,n+1}(t)\}$  with SLA

**[Step 3] Convergence test**

If  $abs(\pi_p^{rs,n+1} - \pi_p^{rs,n}) < \epsilon$ , stop

Otherwise  $n = n + 1$  and go to (Step 2)

위 알고리즘에서 사용된 동적 최단경로(dynamic shortest path) 탐색은 Ran(1998) 등의 최단경로 알고리즘을 사용하였다. 이 방법은 노드기반(node-based) 탐색법이 아니라 링크기반(link-based) 탐색방법으로 Bellman의 최적조건을 링크기반으로 바꾸고, 실제 통행시간을 이용하여 최단경로를 탐색하는 것이다.

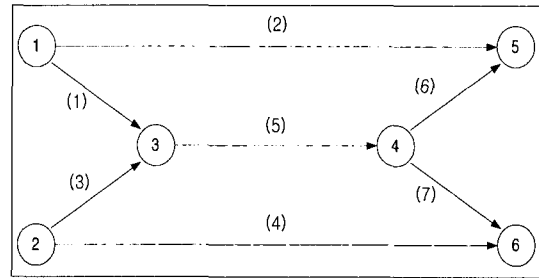
본 연구에서 제시한 알고리즘이 전역최적해를 찾을 수 있을지는 불확실하다. 이는 목적함수의 볼록성을 확인할 수 없음에도 불구하고 최적화 알고리즘으로 볼록결합법을 사용하기 때문이다. 사실 이 문제는 본 연구뿐만 아니라 현재까지 제시된 대부분의 동적 통행

배정모형이 갖고 있는 한계이기도 하다. 그러나 본 연구에서 제시한 알고리즘이 기존 알고리즘에 비해서 수렴성과 계산 결과가 우수할 것으로 예상되는 데, 이는 계산과정에서 기존 연구들(Ran et al(1996), Chen (1999))에서 주로 사용된 변수의 대각화과정이 없기 때문이다. 이를 위해 본 연구에서는 Golden section 기법에 SLA기법을 직접 적용하였다. 따라서, 계산 시간의 경우 대각화기법에 비해 다소 떨어진다고 할 수 있으나, 계산값의 정확성이나 제약식 만족여부, 수렴정도 등에 대해서는 보다 우수하다고 볼 수 있다.

#### IV. 모형의 평가

##### 1. 대상가로망

본 연구에서 개발된 모형을 평가하기 위하여 <그림 2>와 같은 교통망을 사용하였다. 대상 교통망은 노드 6개와 링크 7개로 구성되어 있으며, Yang(1995)이 OD 추정을 위해 사용한 교통망으로 각 기중점쌍에 대해 각 2개의 경로를 제공한다. 각 링크의  $vq_{a,max}(t)$ 는 700veh/hr로서 분석 시간간격( $\Delta t$ )이 60(sec)이므로 각 시간대별  $vq_{a,max}(t)$ 는 약 11.0 vehicle로 일정하다. 그림에서 괄호내 숫자는 링크의 번호를 나타내며, 각 링크의 길이는 링크 2(15km), 링크 4(15km),



<그림 2> 대상가로망

링크 5(8km)이며 나머지 링크의 길이는 모두 3km이다. 링크의 자유 교통류 속도는 60km/hr이다.

기중점 교통량은 기중점 1→5의 경우 40대/시간대(60sec), 2→6의 경우 30 대/시간대(60sec)를 각 10개의 시간대(interval)에 대해 부하(load) 하였다. 가장 큰 경로간 시간차가 30초 이내일 경우 정지하도록 설정한 결과, 반복횟수 15회만에 정지하였다.

##### 2. 분석결과

###### 1) 시간대별 교통량과 통행시간

본 연구에서 개발된 모형을 통하여 각 링크별로 차량의 움직임을 보여 줄 수 있는데, <표 1>은 각 시간대별 링크 1에 유입된 차량의 흐름과 이때 계산된 통행시간을 보여 주고 있다. 먼저 시점  $t=1$ 에 링크 1

<표 1> 링크1의 시간대별 통행량 및 통행시간변화

시간대 (t)	$ur_{1p}^{15}(t)$ (veh)	$xr_{1p}^{15}(t)$ (veh)	$vr_{1p}^{15}(t)$ (veh)	$uq_{1p}^{15}(t)$ (veh)	$xq_{1p}^{15}(t)$ (veh)	$vq_{1p}^{15}(t)$ (veh)	$t_1$ (sec)	$d_1(t)$ (sec)	$\tau_1(t)$ (sec)
1	12.5	12.5	0.0	0.0	0.0	0.0	180.0	0.0	180.0
2	13.2	25.7	0.0	0.0	0.0	0.0	180.0	0.0	180.0
3	13.5	39.2	12.5	12.5	12.5	11.0	180.0	68.1	248.1
4	12.7	39.4	13.2	13.2	14.7	11.0	180.0	80.3	260.3
5	13.8	40.0	13.5	13.5	17.2	11.0	180.0	93.8	273.8
6	14.7	41.2	12.7	12.7	18.9	11.0	180.0	102.8	282.8
7	13.8	42.3	13.8	13.8	21.6	11.0	180.0	118.0	298.0
8	14.0	42.5	14.7	14.7	25.3	11.0	180.0	137.9	317.9
9	16.1	43.9	13.8	13.8	28.1	11.0	180.0	153.1	333.1
10	17.8	47.9	14.0	14.0	31.0	11.0	180.0	169.3	349.3
11	0.0	33.9	16.1	16.1	36.2	11.0	180.0	197.2	377.2
12	0.0	17.8	17.8	17.8	43.0	11.0	180.0	234.5	414.5
13	0.0	0.0	0.0	0.0	32.0	11.0	180.0	174.5	354.5
14	0.0	0.0	0.0	0.0	21.0	11.0	180.0	114.5	294.5
15	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	10.0	180.0	54.5	234.5

에 유입된 차량은 2개의 시간대를 주행구간에 머물다가(즉, 주행하다가)  $t=3$  시간대에 대기구간으로 유입한다. 이때 대기구간에는 기존에 차량이 존재하지 않기 때문에 동일 시간대에 유출용량(11대)만큼 다음 링크로 유출되고 나머지는 다음 시간대에 유출된다. 여기서, 링크 주행시간은 자유 통행속도로 가정했기 때문에 모든 시간대에 항상 180초로 동일하며, 차량대기로 인한 지체가 없기 때문에 총 링크 통행시간은 180초가 된다. 이후 시간대에 링크에 유입된 차량도 동일한 과정을 거쳐 유출된다.

2) 경로통행시간의 비교

동적 통행배정 결과에 따른 각 기종점 교통량의 경로 통행시간 차를 <그림 3>에 나타내었다. 경로통행시간의 비교는 모든 시간간격에 대해 2개의 경로에 대하여 이루어졌으며, 기종점 1→5가 전체적으로 경로 시간차가 작았다. 최대 경로시간 차이는 기종점 1→5의 경우 14초이고 2→6의 경우 28초로서, 이는 전체 경로 통행시간에 대한 비율로 볼 때 각 1.16%와 2.45%로서 경로간에 거의 차이가 없음을 나타낸다. 즉, 경로간에 동적 이용자 평형상태에 도달했음을 알 수 있다. 물론 정지기준을 강화할 경우, 이런 차이는 더 감소할 것으로 예상된다.

3) 대기행렬의 변화

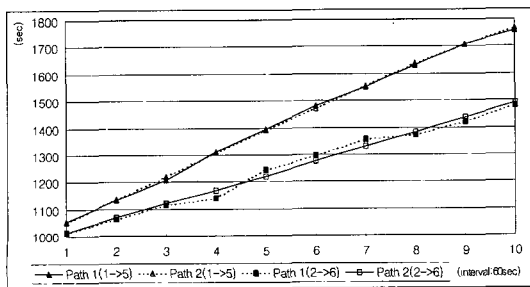
교통류의 동적 행태를 살펴보기 위해 <그림 4>와 <그림 5>에서는 각 기종점쌍간의 경로를 구성하는 링크상의 차량 대기행렬 변화를 살펴보았다.

먼저, 기종점 1→5의 경우(<그림 4>), 링크1에서 가장 먼저 대기행렬이 나타나고 링크 1에서 대기행렬 첨두가 나타난 후 약 12 시간대 후에 링크 2와 링크

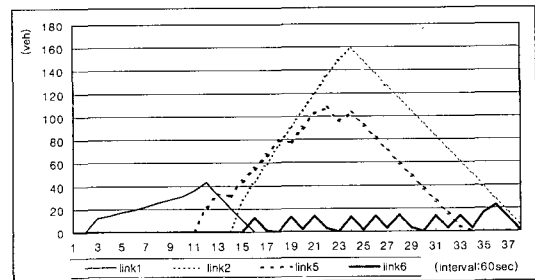
5에서 동시에 최대의 대기행렬이 발생한다. 이는 링크 1의 대기행렬이 커짐에 따라 대기행렬이 링크 2와 링크 5로 전이됨을 보여주고 있다. 링크 6의 경우 시간대 16부터 대기행렬이 나타나 38시간대까지 대기행렬의 첨두가 반복되어 나타나는 현상이 지속되는데, 이는 링크 5에서 유출이 제약되기 때문에 상대적으로 링크 6의 혼잡은 크게 나타나지 않음을 의미하는 것이다. 링크 2와 링크 6의 대기행렬은 시간대 38에서 동시에 소거되며, 이는 경로간의 동적 이용자 균형이 나타남을 증명하는 결과이다. 대기행렬의 첨두행태, 대기행렬의 시간적 전이를 검토할 때 본 연구에서 제시한 동적 통행배정 모형은 동적 이용자 균형을 도출함과 동시에 현실적인 교통류패턴과 흡사한 결과를 나타냄을 알 수 있다.

<그림 5>의 기종점쌍 2→6인 경우에도 <그림 4>의 기종점쌍 1→5와 유사한 대기행렬 행태가 나타나는데, 대기행렬이 소거되는 시점이 시간대 34로서 경로 통행시간은 1→5보다는 작음을 알 수 있다. 이는 2→6의 기종점 교통량이 1→5에 비해서는 작기 때문이다. 링크 4의 경우 링크 2에 비해서는 첨두 대기행렬의 길이가 작게 나타나지만 첨두시간은 링크 2, 4, 5에서 유사하게 나타나며, 이는 복수 기종점쌍에 대한 통행배정으로 현실적인 교통류의 혼잡시간대를 보여주고 있다. 만약, 확률적 동적 통행배정을 통해 경로 통행시간에 대한 인지오차를 부여한다면, 각 경로별로 첨두시간이 차이를 보이는 결과를 나타낼 수도 있을 것이다.

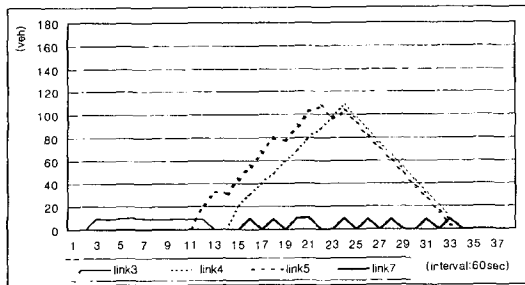
모형에서 도출된 결과를 살펴보면, 모든 링크에서 교통류는 정확한 유입/유출시간 관계를 나타내어 교통류 전파조건을 만족하고 있으며, 링크 통행시간 역시 FIFO 제약조건을 만족하고 있다. 또한 링크의 유출량 역시 해당 제약식을 만족하고 있다.



<그림 3> 경로 통행시간의 차이비교



<그림 4> 대기행렬 변화(기종점쌍 1→5)



〈그림 5〉 대기행렬 변화(기종점쌍 2→6)

## 5. 결론

본 연구에서는 경로 교통류를 기반으로 한 동적 통행배정 모형을 제시하였다. 개발된 동적 통행배정 모형을 예제 교통망에서 분석한 결과 만족스러운 평형 상태를 얻을 수 있었고 도출된 대기행렬 행태 또한 현실적인 상황을 묘사할 수 있을 것으로 판단되었다. 본 연구에서 개발된 SLA에 의한 교통류 부하 결과, 별다른 추가적인 고려 없이 교통류전파, FIFO 제약 등이 손쉽게 만족되었다는 점은 향후 SLA의 적용가능성을 확인할 수 있는 결과이다.

또한 전통적인 대기행렬이론에 의해 계산된 링크 통행시간과 주행교통량 간의 관계가 현실에서 관측되는 동적 교통류의 특성을 묘사할 수 있다는 가능성도 확인하였다. 만약 SLA의 교통류 진행 기법이 좀 더 현실적인 교통류 진행상황을 묘사할 수 있도록 교통류 이론에 의해 수정된다면, 충격파(shock wave)나 앞막힘 현상(spill back)뿐만 아니라 회전교통류별 유출시간차 등을 고려할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구를 통하여 도출된 또 다른 결과로는, 경로 교통류를 기반으로 동적 통행배정모형을 구축한 결과, 링크 기반의 동적 통행배정모형에 비해 제약식 만족이 쉽고, 분석 시간간격의 길이에 대해서도 안정적인 결과를 얻을 수 있었다는 것이다.

그러나, 본 모형의 한계로는 수직형 대기행렬의 특성상 대기행렬의 물리적 길이를 고려하지 못해 교통류의 앞막힘 현상을 실제적으로 묘사되지 못한 점이다. 따라서, 물리적인 대기행렬길이를 표현할 수 있는 수평형 대기행렬모형의 개발이 요구되며, 이 경우 교통류 특성을 좀 더 정확히 묘사할 수 있는 교통류 모형의 개발이 필요하다. 또한, 현재까지는 링크 유입용량제약에 대한 조건이 없었으나, 현실적으로 이에 대한 연구도 필요하다. 마지막으로 동적 통행배정 문제

는 원천적으로 비볼록성을 갖고 있는데, 이는 단순히 목적함수의 변화나 제약식의 완화만으로는 극복할 수 없을 것으로 보이며 부분적인 대각화기법을 통해서도 완전히 극복할 수 없을 것으로 판단된다. 따라서 보다 정확한 해 도출을 위해서는 유전알고리즘(Genetic algorithm)이나 Simulated Annealing과 같은 전역탐색 알고리즘을 이용하는 접근법이 필요할 것으로 보인다.

## 참고문헌

1. Akamatsu T., A Dynamic Traffic Equilibrium Assignment Paradox, Transportation Research B, 2000.
2. Carey M., A constant qualification for a dynamic traffic assignment model. Transportation Science, 20, pp.55~58, 1986.
3. Carey M., Nonconvexity of the dynamic traffic assignment problem. Transportation Research. 26B, 1992.
4. Chen H. K., Dynamic travel choice models. Springer, 1999.
5. Chen H. K., Feng G., Heuristics for the stochastic/dynamic user-optimal route choice problem, European journal of operation research 126, 2000.
6. Daganzo C. F., The cell transmission model : A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. Transportation Research. B., 1994.
7. Drissi-Kaitouni Omar, Hameda-Benchekroun Abdelhamid. A Dynamic Traffic Assignment Model and a Solution Algorithm, Transportation Science. 26, 1992.
8. Friesz T. L., Luque F. J., Tobin R. L. and Wie B. W., Dynamic network traffic assignment considered as a continuous time optimal control problem, Operations Research, 37, pp.893~901, 1989.
9. Friesz T. L., Bernstein D., Smith T. E., Tobin R. L. and Wie B. W., A variational inequality formulation of the dynamic network user

- equilibrium problem. *Operations Research*, 41, pp.179~191, 1993.
10. Hearn D. W., The gap function of a convex program, *Operations research letters*, 1982.
  11. Janson B. N., Dynamic traffic assignment for urban road networks. *Transportation Research*, 25B, 1991.
  12. Janson B. N., Dynamic traffic assignment with schedule delay. Paper presented at 72nd Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, DC, 1992.
  13. Jayakrishnan R., Wei K. Tsai, Anthoeny Chen., A dynamic traffic assignment model with traffic-flow relationships. *Transportation Research*, 3C, 1995.
  14. Kuwahara M., Akamatsu T., Decomposition of the reactive dynamic assignments with queues for a many-to-many origin destination pattern, *Transportation Research*, 31B, 1997.
  15. Lam, W. H. K., Huang, H. J., Dynamic user optimal traffic assignment model for many to one travel demand, *Transportation Research* 29B, pp.243~259, 1995.
  16. LeBlanc L. J. and Boyce D. E., A bilevel programming algorithm for exact solution of the network design problem with user-optimum flows. *Transportation Research*, 20B, 1986.
  17. Li Jun, Okitsugu Fujiwara, Shogo Kawakami, A Reactive Dynamic User Equilibrium Model in Network with Queues, *Transportation Research*, B, 2000.
  18. Lo H. K., Szeto W. Y., Properties of a Cell-based dynamic traffic assignment model, *TRB anual meeting* 2000.
  19. Mahmassani H. S. and Peeta S. Network performance under system optimal and user equilibrium dynamic assignment : Implications for ATIS. Paper presented at 72nd Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, DC, 1993.
  20. Merchant D. K. and Nemhausser G. L., A model and an algorithm for the dynamic traffic assignment problems. *Transportation Science*, 12, 1978a.
  21. Merchant D. K. and Nemhausser G. L., Optimality conditions for a dynamic traffic assignment model. *Transportation Science*, 12, 1978b.
  22. Patriksson M., The traffic assignment problem, VSP, 1994.
  23. Ran B., Boyce D. E., Modeling dynamic transportation networks. Springer, 1996.
  24. Ran B., Roupail N. M., Tarko A., Boyce D. E, Toward a class of link travel time functions for dynamic assignment models on signalized networks, *Transportation Research*, B, 1997.
  25. Sheffi Y, Urban transportation networks, MIT press, 1985.
  26. Wie B.W., Friesz T.L. and Tobin R.L., Dynamic user optimal traffic assignment on congested multidestination networks, *Transportation Research*, 24B, pp.431~442, 1990.
  28. Wie B. W., Tobin R. L., Friesz T. L., Bernstein D., A discrete time, nested cost operator approach to the dynamic network user equilibrium problem, *Transportation Science* 29(1), pp.79~92, 1995.
  29. Yang H., Heuristic algorithms for the bilevel O-D matrix estimation problem, *Transportation Research* 29, 1995.
- ✉ 주 작 성 자 : 임용택  
 ✉ 논문투고일 : 2001. 4. 16  
 논문심사일 : 2001. 5. 31 (1차)  
                   2001. 6. 8 (2차)  
 심사판정일 : 2001. 6. 8