

수평 대기행렬을 고려한 동적 통행배정 모형에 관한 연구

A Study on Dynamic Traffic Assignment Model using Horizontal Queue

민진아

(서울시립대, 석사과정, loveox@hananet.net)

이승재

(서울시립대, 부교수,
seungjaelee@uoscc.uos.ac.kr)

목 차

-
- | | |
|-----------------------|-----------------|
| I. 서론 | 3. 유출입 · 링크 교통량 |
| II. 이론적 배경 | 4. 전체 구조 |
| 1. 동적 통행배정 모형에서의 고려사항 | IV. 모형의 평가 |
| 2. 링크성과함수 | 1. 모의 네트워크 구축 |
| 3. 시간 의존적인 최적경로 알고리즘 | 2. 모의 실험 결과 |
| III. 모형의 이론 및 구조 | V. 결론 및 향후과제 |
| 1. 시간에 따른 용량 | 참고 문헌 |
| 2. 링크통행시간 | |
-

I. 서론

현재까지 제시된 동적 통행배정 모형들은 많은 노력을 기울여 왔음에도 불구하고 아직까지 모형의 안정적 인 수렴성과 동적 통행배정 모형이 갖는 여러 제약조건 들을 만족시키기에는 미흡한 상태이다. 동적 통행배정 모형의 경우, 각 링크의 대기행렬 길이, 동적 링크통행 시간, 유입 · 유출교통량의 동적 변화가 교통류 이론에 부합하도록 설계되어야 한다. 또한, 링크성과함수의 계산이 간단해야 많은 수의 링크와 노드를 다루는 통행배 정모형을 빠르게 수행할 수 있는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 계산이 간단하고 입력변수가 단순한 대기행렬모형을 이용하여 링크성과함수를 나타내고자 한다. 좀 더 구체적으로 말하자면, 수평 대기행렬 모형을 통해 기존 대기행렬 모형이 갖는 앞막힘(Spill-back) 현상의 비현실적 표현이라는 한계점을 극복하고, 하류 부의 교통상황에 따라 상류부 용량이 변화하는 현상까지도 반영하여 좀 더 현실적인 링크성과함수를 계산한다. 또한, 현실적인 링크성과함수식에 의해 미리 차량을 진행시켜봄으로써 미래 교통상태가 반영된 링크별 시간대별 통행시간을 산출하고, 이를 근거로 예측 최적 경로를 탐색한다.

본 연구의 순서는 다음과 같다. 우선 2장에서는 동적 통행배정 모형의 고려사항 및 기존 이론을 고찰하고, 3장에서는 모형의 이론 및 구조를 설명한다. 4장에

서는 모의 실험을 통하여 모형을 평가하고, 마지막으로 5장에서는 결론 및 향후과제를 도출한다.

II. 이론적 배경

1. 동적 통행배정 모형에서의 고려사항

동적 통행배정 모형이 정적 통행배정 모형과 구분 되는 가장 큰 특징은 시간 변수를 고려한다는 것이다. 따라서 동적 통행배정 모형에서는 시간대별 기종점 교통량 수요의 추정과 합리적인 경로 통행시간의 계산이 필요하다. 또한 유입 · 유출교통량과 대기행렬 길이, 하류부 교통량에 따라 변화하는 용량, 이에 따른 통행시간의 변화를 시간대별로 분석해야 한다. 동적 통행배 정 모형은 시간을 고려하여 각 교통량의 움직임을 파악해야 하기 때문에 정적 통행배정 모형에 비해 많은 저장용량과 긴 계산 시간을 필요로 한다. 따라서 효율적인 메모리 관리 및 수행 시간 단축을 위하여 모형 설계시 자료 구조에 대한 고려가 필요하다.

추가로, 차량의 흐름을 동적으로 표현하기 위해 고려해야 하는 4가지 제약식들이 있다. 인과성, 선입 선출 조건, 교통량전파, 교통류보존 법칙이 이에 해당한다.

2. 링크성과함수

동적 통행배정 모형에서 통행시간은 유입된 교통량이 언제 빠져나갈지를 나타내기 때문에 모형의 정확도 및 신뢰성에 큰 영향을 미친다. 만약 단순히 링크 통행시간만을 고려한다면 어떤 링크의 진출시간은 그 링크에 진입한 시간에 링크를 주행한 시간만 더하면 된다. 그러나, 동적 통행배정 모형에서는 링크통행시간과 뿐만 아니라 얼마만큼의 교통량이 그 링크를 빠져나갈 것인지에 대해서도 계산되어야만 한다. 이는 이전 링크의 유출교통량을 알지 못한다면 다음 링크의 유입교통량을 알 수 없기 때문이다. 통행시간과 교통량의 관계를 나타내는 기존의 이론을 살펴보면 다음과 같다.

1) 수직형 대기행렬 모형

Newell(1982)의 수직 대기행렬 모형에서는 차량들이 자유속도(Free-Flow Speed)로 운행하다가 하류부에 대기행렬이 있거나, 하류부 용량이 진입 교통량보다 적을 경우 지체를 경험하게 된다고 가정한다. 수직 대기행렬 모형은 이해하기 쉽고 적용하기도 간편하여 거시적 교통류분석 모형으로 많이 사용되어왔으며, 최근에는 동적 통행배정 모형의 링크비용함수로도 사용되고 있다. 그러나, 이러한 대기행렬 모형에서는 대기행렬이 수직적으로 쌓인다고 가정하고 또한 한 도로구간이 가지는 용량은 하류부 교통상황에 관계없이 일정하다고 가정하기 때문에 Spill-Back 현상을 반영하지 못한다. 우선, 대기행렬이 수직으로 쌓인다는 가정 때문에 대기행렬의 길이가 링크 길이를 벗어나는 비현실적인 상황이 모형 속에서 허용된다. 또한, 하류부 연결링크에 차량이 가득 들어차더라도 그 링크로 차량이 계속적으로 유입될 수 있는 한계를 가지고 있다.

2) 수평형 대기행렬 모형

한상진(2002)은 대기행렬이 수직으로 쌓인다는 기존 대기행렬의 가정을 극복하는 수평 대기행렬 모형식(합류구간)을 개발하였다. 차량들이 링크의 하류부까지는 자유속도로 진행하다가, 하류부에서 수직적 대기행렬 때문에 지체현상을 경험한다고 가정하기보다는 자유속도로 진행할 수 있는 구간은 대기행렬의 꼬리까지만이라고 가정한다. 한상진(2002)은 간단한 모의 네트워크에서 교통량을 로딩>Loading)시켰는데, 본 연구에서는 분류구간까지 고려한 수평 대기행렬 모형을 개발하고, 확장된 네트워크에 적용 하며, 동적 통행배정까지 하고자 한다.

3. 시간 의존적인 최단경로 알고리즘

(Time-dependent shortest path algorithm)

동적 통행배정 모형에서 현실에 맞는 예측 최적경로는 동적 교통량 배정에 중요한 요소이다. 동적 모형에서 노드 i에서 j까지의 최적경로를 탐색하는 문제는 시간에 따라 변하는 링크통행시간의 합에 기반하기 때문에 시간 의존적이라 할 수 있다. 시간 의존적 최적경로는 노드 i에서 j까지의 통행시간이 노드 i에서의 출발시간에 종속적이라는 개념에 바탕을 두고 있는 것으로 시간경과에 따라 통행비용이 변화하는 실제 교통망에서 보다 현실적인 알고리즘이라 할 수 있다.

III. 모형의 이론 및 구조

1. 시간에 따른 용량

상류부 링크의 용량이 하류부 링크의 교통상황에 따라 변한다는 개념으로 시간 t에 링크 a의 용량 $Q_a(t)$ 를 계산한다. 이를 통해, 앞막힘 현상에 의해 유출용량이 제약될 수 있는 상황을 반영한다. 하류부 링크가 받아들일 수 있는 차량대수에 의해 제약을 받게되는 상류부 링크의 용량식은 식 (1)과 같다.

$$Q_a(t) = \sum_{b \in a} Q_{ab}(t) \quad \text{식(1)}$$

$$i) \frac{D_b^{\max}}{l} - x_b(t) < \sum_a Q_a \cdot \frac{Q_b}{\sum_b Q_b} \text{ 이면}$$

$$Q_{ab}(t) = \left(\frac{D_b^{\max}}{l} - x_b(t) \right) \cdot \frac{Q_a}{\sum_a Q_a}$$

$$ii) \frac{D_b^{\max}}{l} - x_b(t) \geq \sum_a Q_a \cdot \frac{Q_b}{\sum_b Q_b} \text{ 이면}$$

$$Q_{ab}(t) = Q_a \cdot \frac{Q_b}{\sum_b Q_b}$$

여기서, D_{\max} 는 분석구간의 길이, v_f 는 자유속도, l 은 앞차와의 간격을 포함한 평균차두거리를 나타낸다. $x_b(t)$ 는 시간 t에 링크 b에 남아있는 차량대수 혹은 대기행렬 길이, a는 상류부 링크($a' \in a$)는 연결된 상류부 링크: $a' \in a$), b는 하류부 링크($b' \in b$)는 연결된 하류부 링크: $b' \in b$)이다.

2. 링크통행시간

본 모형에서 링크통행시간은 running time과 horizontal queue length에 따라 변한다. 이는 horizontal queue length가 길어질수록 지체시간이 증가하고, 짧아질수록 지체시간이 감소하며, 따라서 실제로 자유속도로 진행할 수 있는 시간(running time)이 대기행렬

길이에 따라 변하는 것을 반영하여 좀 더 현실적으로 링크통행시간이 계산됨을 의미한다. 시간 t에 링크 a의 통행시간 $c_a(t)$ 는 식(2)와 같다.

$$c_a(t) = \frac{D_a^{\max} - l \cdot x_a(t)}{v_f} + \frac{x_a(t)}{Q_a(t)} \quad \text{식(2)}$$

3. 유출입 · 링크 교통량

본 모형에서 유출교통량($g_a(t)$)은 하류부의 대기행렬 길이에 따라 제약받는 상류부의 유출용량, 동적 통행배정 모형에서 고려해야 하는 FIFO 조건 그리고 각 차량군 별 최적경로를 고려하여 계산한다. 이는 예측 최적경로 상 다음 링크(하류부)의 시간에 따른 용량이 상류부 링크의 유출교통량에 영향을 미치는 것을 의미한다.

본 모형에서 유입교통량($e_a(t)$)은 크게 두 가지 교통량의 합으로 계산된다. 하나는 같은 시간에 이전 링크의 유출교통량이며, 다른 하나는 링크에 해당되는 시간대별 기종점 교통수요이다. 이를 수식으로 표현하면 식(3)과 같다.

$$e_b(t) = \sum g_{ab}(t) + OD_{B.}(t) \quad \text{식(3)}$$

여기서, $OD_{B.}(t)$ 는 시간 t에 발생하는 교통수요 중 기점이 b 링크의 from 노드인 전체 교통수요량을 의미한다.

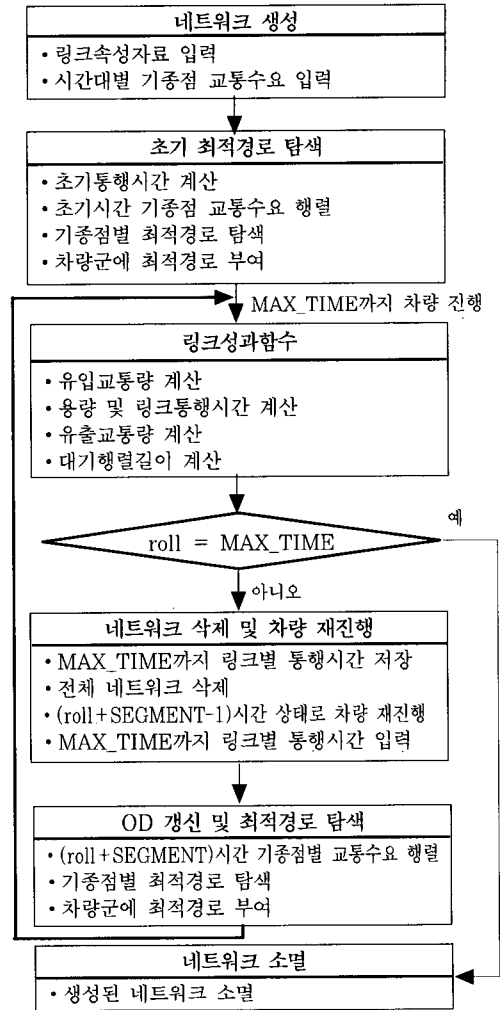
본 모형에서 대기행렬의 길이(링크에 존재하는 교통량)는 같은 시간 유출입교통량에 따라 변한다. 이를 수식으로 표현하면 식(4)와 같다.

$$x_a(t) = x_a(t-1) + e_a(t) - g_a(t) \quad \text{식(4)}$$

4. 전체 구조

〈그림 1〉은 전체 모형의 구조를 나타낸다.

여기서, MAX_TIME은 총 분석시간, roll은 반복횟수, SEGMENT는 최적 경로를 찾는 Time Interval을 의미한다. 결과 자료로는 시간에 따라 변하는 링크별 용량, 통행시간, 유출입교통량, 대기행렬 차량대수, 종점에 도착한 차량군의 순서대로 차량군이 발생한 시간, 차량대수, 총 통행시간, 주행 경로를 파일에 저장한다.

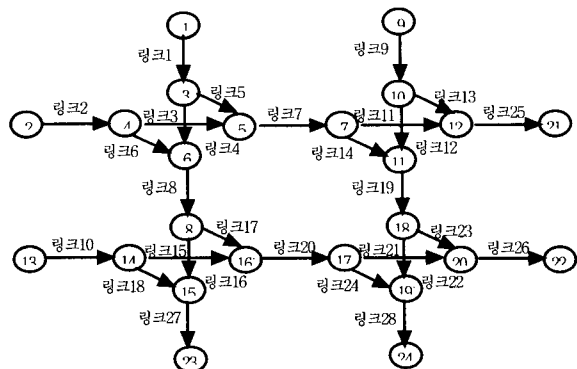


〈그림 1〉 모형의 구조

IV. 모형의 평가

1. 모의 네트워크 구축

개발된 모형의 적합성을 검증하기 위해서 모의 네트워크에 적용하여 본다. 〈그림 2〉의 네트워크는 도시부 도로를 형상화한 것으로 각 교차로 접근로별 노드링크 체계를 갖는다.



〈그림 2〉 모의 네트워크

총 분석시간은 300분이며, 단위분석시간은 1분, 자유속도는 60km/h, 차량 길이는 6m, 링크길이와 용량은 교차로 연결링크 500m, 36.67대/분, 교차로 직진 링크 300m, 22.0대/분, 교차로 회전링크 200m, 14.67대/분이다. 기종점별 교통수요는 <표 1>과 같다.

<표 1> 기종점별 교통수요

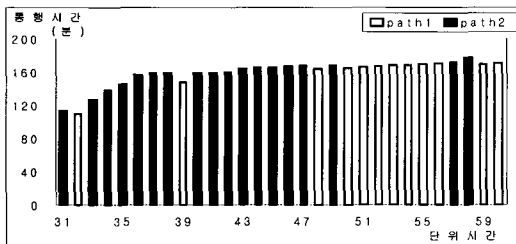
O \ D	노드21	노드22	노드23	노드24	총합계
노드1		600		600	1200
노드2		600		600	1200
노드9	600	600		600	1800
노드13		600	600	600	1800
총합계	600	2400	600	2400	6000

2. 모의 실험 결과

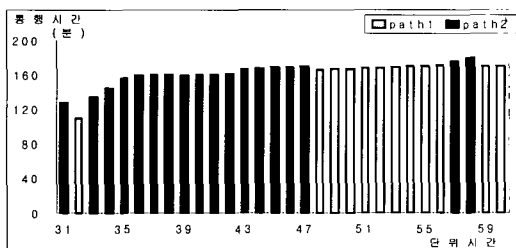
모든 기점에서 차량이 발생, 모든 종점에 도착한 차량의 합은 전체 총 교통수요 6000대와 같고, 링크별로도 교통류 보존법칙과 FIFO조건을 만족하는 것으로 확인되었다. 편의상 두 개의 기종점 최적경로와 링크 14의 시간에 따른 용량, 대기행렬 차량대수를 제시한다.

1) 시간대별 최적경로 및 통행시간

<그림 3, 4>는 시간 t에 발생한 차량군들이 주행한 최적경로와 총 통행시간을 나타낸다. 각 기종점별로 시간에 따라 최적경로가 달라지는 것을 볼 수 있고 어느 정도 교통량이 배정된 t=35부터는 어느 path를 이용하던지 전체 통행시간이 비슷한 평형 상태를 이루게 된다.



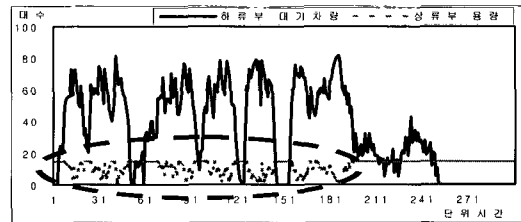
<그림 3> 기점노드 1 - 종점노드 22



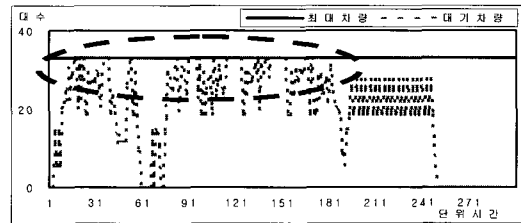
<그림 4> 기점노드 1 - 종점노드 24

2) 링크 14의 적용결과

<그림 5>는 하류부 링크의 대기차량대수에 따라 상류부 링크의 용량이 감소하는 결과 그래프이다. <그림 6>은 모형결과의 지체 대기차량대수와 링크의 물리적 길이를 고려한 최대차량대수(링크길이/차량대수)의 관계를 나타낸다. 지체 최대 차량대수가 최대차량대수를 넘지 않는 것을 통해서, 기존의 대기행렬 모형의 한계를 극복한 것을 확인할 수 있다. 다시 말해, 앞막힘 현상(Spill-Back phenomenon)을 현실적으로 표현함을 의미한다.



<그림 5> 링크 14의 시간에 따른 용량



<그림 6> 링크 14의 대기행렬 길이

VI. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 기존의 대기행렬 차량이 수직으로 생긴다는 모순을 보완하여 보다 현실적인 표현을 하고자 수평 대기행렬을 개발하였으며, 단위시간마다 모든 시간대별 링크통행시간을 예측하여 실제 운전자 주행할 때 겪게되는 예측최적경로를 탐색하여 기존의 현재시점 기준 동적최적경로보다 신뢰성있는 경로를 제시하였다. 또한, 본 모형은 동적 통행배정 모형의 4가지 제약식을 모두 만족한다.

향후 연구과제로는 대규모 네트워크에 모형을 적용하고, 실제 교통정보와의 비교를 통하여 모형을 검증할 필요가 있으며, 구체적으로 현재시점기준 동적최적경로와의 차이를 수치적으로 비교해 볼 필요가 있다.

참고 문헌

1. 한상진, 2002, "동적 네트워크 로딩 방법 및 적용

- 에 관한 연구”, 대한교통학회지, 제20권 제1호, pp. 101-110.
2. Ran, B., and Shin, S., 1998, “Enhancement of an analytical dynamic traffic assignment model for establishing evaluation benchmarks”, Oak Ridge National Laboratory Federal Highway Administration.