

■ 論 文 ■

동적 통행배정모형을 위한 교통류 부하모형의 개발

Development of A Network loading model for Dynamic traffic Assignment

임 강 원

(서울대학교 환경대학원 교수)

목 차

- | | |
|----------------------|------------|
| I. 서론 | IV. 모형의 평가 |
| II. 교통류특성 | 1. 입력자료 |
| III. 수직형 동적 교통류 부하모형 | 2. 분석결과 |
| 1. 제약조건 | V. 결론 |
| 2. 시뮬레이션 교통망부하기법 | 참고문헌 |

Key Words : 교통류 부하모형, 동적 통행배정, 수직형 대기행렬, 시뮬레이션, 후굴현상(Backward curve)

요 약

동적 통행배정모형에서 주로 사용되는 링크 통행비용함수가 현실상황을 제대로 표현하지 못함에 따라, 최근 교통류의 특성을 현실적으로 묘사할 수 있는 여러 형태의 교통류모형(Traffic model)들이 제시되고 있다. 현재 까지 개발된 모형들을 차량의 동적 움직임을 표현하는 가장 특징적인 요소인 교통류 전파(flow propagation) 과정에 따라 구분하면, 교통량-통행시간(Flow-travel time)간의 관계를 명시적인 함수 형태로 사용하는 경우(Functional approach)와 Cell transmission model이나 개별차량 또는 몇 개의 차량을 1개의 그룹으로 묶은 미시적인 패킷(package)에 기초한 시뮬레이션 형태로 표현하는 경우로(Non-functional approach)나눌 수 있다. 그러나 함수형태의 비용함수는 여러 연구에서 실제 차량의 행태를 묘사하는 데에는 한계가 있음을 보여주고 있다. 따라서, 본 연구에서는 차량의 통행시간을 패킷기초의 시뮬레이션으로 묘사하는 기법을 개발하는데, 수직형 대기행렬모형(Vertical queue model 또는 Point Queue model)으로 개발한다.

개발된 모형의 동적 교통류 표현능력을 검토하기 위하여 교통류의 전파를 시간 종속적으로 재현하는 시뮬레이션 부하기법(Simulation loading algorithm)을 개발하고 개발된 모형을 상용 프로그램과 비교한다. 본 연구에서는 교통류의 기본 변수인 교통량-속도-밀도간의 관계와 통행시간간의 관계를 살펴본다. 분석결과, 미시적 모형에 비해 상대적으로 간단한 전파규칙(propagation rule)을 사용함에도 불구하고 현실적인 교통류에서 나타나는 중요한 특성들을 모두 확인할 수 있었다.

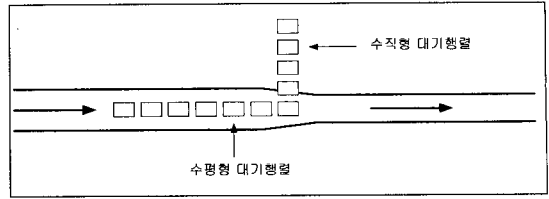
이 연구는 2001년도 서울대학교 발전기금 및 간접연구경비에서 지원되는 연구비에 의하여 수행되었음.

1. 서론

동적 통행배정모형을 위하여 현재까지 제시된 교통망 부하(Dynamic Network Loading:DNL)모형들은 실제 교통망의 동적 통행패턴의 묘사를 위해 많은 노력을 기울여왔음에도 불구하고 아직까지도 모형의 안정적인 수렴성과 동적 통행배정 모형이 갖는 여러 제약조건들을 만족시키기에는 미흡한 상태이다. 동적 통행배정 모형의 경우, 정적인 통행배정모형(Static Traffic Assignment)에서 고려하는 사용자의 경로 선택문제(Route Choice Problem)뿐만 아니라 각 링크의 대기행렬 길이(Queue delay), 동적통행시간(Dynamic Travel Time), 유입·유출 교통량(Inflow and Outflow)의 동적 변화가 교통류이론(Traffic flow theory)에 부합하도록 설계되어야 한다. 따라서 이런 동적 제약조건들을 만족시키는 동적 교통망부하 모형(DNL Model)이 얼마나 현실을 정확히 묘사하는가 중요하며, 이 과정이 동적 통행배정모형의 핵심이 된다. 동적 교통망부하(Dynamic Network Loading, DNL)는 주어진 경로(Route)를 따라 각 링크(Link)상 교통류의 흐름과 노드(Node)에서의 교통류의 분류, 합류 과정 등이 포함된다.

동적 교통망부하 모형은 차량 대기행렬을 표현하는 방법에 따라 크게 2가지로 구분된다. 즉, 아래 <그림 1>과 같이 차량을 병목구간이나 신호교차로의 바로 앞에서 위로 쌓아 표현하는 수직형 교통망 부하모형(Vertical 또는 Point queue DNL)과 차량의 물리적인 위치를 고려하여 수평으로 표현하는 수평형 교통망 부하모형(Horizontal queue DNL)이 있다. 현재까지 개발된 대부분의 동적 통행배정 모형들은 수직형 대기행렬(Vertical queue, point queue theory) 부하모형을 사용하여 왔다. 이런 연구들은 전통적인 대기행렬이론에 따른 것으로 FIFO조건, 교통량 전파조건(Flow propagation constraint) 등을 쉽게 만족시킬 수 있다는 장점이 있다. 그러나 수직형 대기행렬을 고려한다는 점에서 링크의 앞막힘(spill-back) 현상 등 물리적인 특성을 합리적으로 묘사하는데 한계가 있다. 이런 문제점을 극복하기 위해 수평형 대기행렬 교통망 부하모형을 개발하려는 연구가 진행되고 있으나 아직 시작단계에 있다(Astarita, 1996; Adamo et al., 1999).

본 연구에서는 수직형 대기행렬이론에 기반한 시뮬



<그림 1> 수직형 대기행렬과 수평형 대기행렬

레이션 부하기법(Simulation Loading Algorithm: SLA)을 제시한다. 이는 동적 통행비용함수에 의한 방법에 비해 차량의 움직임을 현실 교통류에 가깝게 묘사할 수 있다. SLA기법은 차량은 패킷(Packet)으로 구분하여 움직임을 표현하였으며, 대기중인 차량 중 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. 개발된 모형의 결과를 현재 널리 사용되고 있는 상용프로그램인 INTEGRATION과 비교한 결과, 간단한 교통류 전파조건을 사용함에도 불구하고 현실적인 교통류에서 나타나는 중요한 특성들을 모두 확인할 수 있었다.

II. 교통류특성(Flow characteristics)

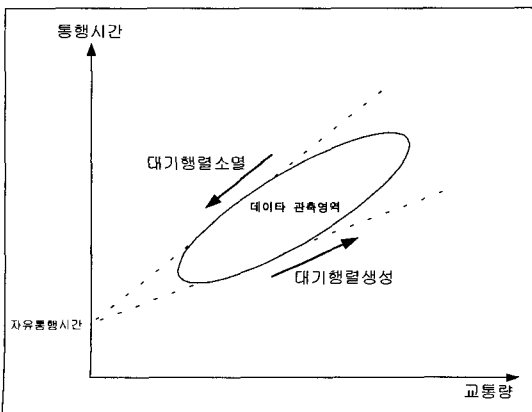
연속류 구간에서 나타나는 교통류 특성중, 링크상 유출입 차량과 통행시간간의 관계에 다음과 같은 세 가지 특성이 나타나고 있음이 알려져 있다.

- a) 후굴성 : 링크 통행시간의 후굴성이란 동일한 교통량에서 링크의 혼잡이 증가할 때 나타나는 통행 시간보다 혼잡이 감소될 때 오히려 통행시간이 증가하는 현상이다. 즉, 대기행렬 증가시 곡선의 형태는 단조증가형태를 가지며 지수적 증가양상을 보인다. 반면 대기행렬이 감소하는 경우, 감소초기 부분에 교통량이 감소하더라도 통행시간이 크게 줄어들지 않는 현상이 나타나고 때로는 약간의 증가양상을 보이고 하는데 이를 후굴(backward curve)현상이라 한다. 그러나 이런 현상은 정적 통행배정에서 사용하는 강단조 증가함수로는 묘사할 수가 없다.

- b) 비가역성 : 비가역성이란 혼잡이 증가하는 구간과 감소하는 구간의 통행시간-주행교통량의 함수 특성이 다르게 나타난다는 것이다. 즉, 혼잡이 증가할 때 나타나는 곡선의 특성이 감소할 때 동일하게 나타나지 않고 교통량에 대한 통행시간 증가/감소의 민감도에 차이가 있다는 의미이다.
- c) 다중성 : 다중성이란 단일한 주행교통량에 대해서 여러 개의 통행시간이 나타난다는 것이다. 이러한 현상은 비교적 안정된 교통류패턴을 보이는 상황에서 나타날 수 있으며, 실제 현장조사자료를 보면 거의 유사한 주행교통량에 대해 다양한 통행시간이 도출됨을 알 수 있다.

이러한 관계들은 <그림 2>로 나타낼 수 있다.

<그림 2>는 실제 조사에서 나타나는 링크의 주행교통량과 통행시간간의 관계를 개략적으로 도해한 것이다. 대기행렬 증가구간의 경우 곡선의 형태는 단조 증가형태를 가지며 지수적 증가양상을 보인다. 반면 대기행렬이 소멸하는 구간의 경우 감소의 초기 부분에서는 교통량이 감소하더라도 통행시간이 크게 줄어 들지 않는 현상이 나타나고 때로는 약간의 증가양상을 보이고 하는데 이를 앞에서 설명한 후굴(backward curve)현상이라 한다. 또 이러한 감소양상이 지속되다가 낮은 교통량수준까지 떨어지면 통행시간이 급격히 감소하는 양상을 보여 상하의 두 곡선간의 기울기에도 차이가 나타나는데, 이는 비가역성을 의미하는 것이다. 그밖에 일정 교통량 수준이 되면 하나의 교통량에서 다양한 통행시간 값이 도출되는데 이는 다중성이라 한다.



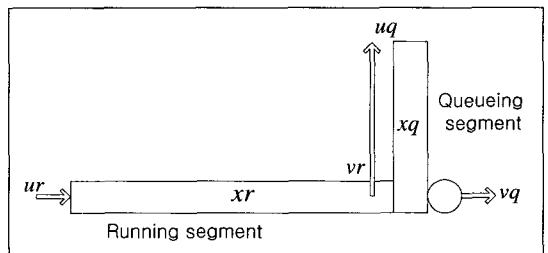
<그림 2> 교통량과 링크 통행시간의 관계

III. 수직형 동적 교통류 부하모형

본 연구에서는 경로 교통류의 동적 이동상황을 현실적으로 묘사하기 위해 시뮬레이션 부하기법(Simulation Loading Algorithm:SLA)을 개발하였다. SLA의 기본구조는 대기행렬이론과 수평형 대기이론 및 시뮬레이션 모형을 결합한 것이다.

1. 제약조건

먼저, 차량의 흐름을 동적으로 표현하는 동적 제약식들을 살펴보자. 본 연구에서는 링크를 통행상태에 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 대기행렬(Horizontal queues)가 아니라, 수직적인 대기행렬(Point queues 또는 Vertical queues)를 가정한다.



<그림 3> 수직형 대기행렬의 개념도

1) 상태방정식(State equation)

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.

$$xr_{ap}^{ns}(t) = xr_{ap}^{ns}(t-1) + ur_{ap}^{ns}(t) - vr_{ap}^{ns}(t-1)$$

$$xq_{ap}^{ns}(t) = xq_{ap}^{ns}(t-1) + uq_{ap}^{ns}(t) - vq_{ap}^{ns}(t-1)$$

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. $xq_{ap}^{rs}(t)$, $uq_{ap}^{rs}(t)$, $vq_{ap}^{rs}(t)$ 역시 동일하게 정의되는 데, 각각 대기구간에서의 유입, 유출 그리고 존재 교통량을 나타낸다.

2) 교통류 전파제약(Flow propagation constraints)

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

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

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

여기서, $t_a(t)$ 는 t 시점에 유입한 차량이 링크 주행구간을 통행하는 통행시간을 나타내며, $d_a(t)$ 는 대기구간에서 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)

선입선출제약조건(FIFO조건)은 실제 교통망상에서 엄밀히 지켜지지 않으며, 수학적 구성식에서 실행가능영역을 비볼록하게 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 FIFO 조건이 필요하기 때문에 일반적으로 이를 제약조건에 포함시키고 있다. 본 연구에서는 Ran et al(1996)이 제시한 다음과 같은 FIFO 조건을 적용한다.

$$\dot{r}_a(t) > -1$$

여기서, $\dot{r}_a(t)$ 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 물

리적 특성에 의해 제약된다. 본 연구에서는 대기구간에서 차량이 다음 링크로 유출되므로, 다음과 같이 유출용량제약을 갖는다.

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

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 비볼록해질 수 있기 때문에 본 연구에서는 아래와 같이 고정된 값을 사용하였다.

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

5) 기타 제약조건(other constraints)

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

① 교통량 보존제약(Flow conservation constraints)

$$\sum_{a \in B(j)} vq_{ap}^{rs}(t) = \sum_{a \in A(j)} ur_{ap}^{rs}(t), uq_{ap}^{rs}(t) = vr_{ap}^{rs}(t)$$

② 비음제약(nonnegativity constraints)

$$xr_{ap}^{rs}(t) \geq 0, ur_{ap}^{rs}(t) \geq 0, vr_{ap}^{rs}(t) \geq 0,$$

$$xq_{ap}^{rs}(t) \geq 0, uq_{ap}^{rs}(t) \geq 0, vq_{ap}^{rs}(t) \geq 0$$

③ 정의적인 제약(definitional constraints)

$$\sum_{rs} ur_{ap}^{rs}(t) \delta_{ap}^{rs} = ur_a(t), \sum_{rs} vq_{ap}^{rs}(t) \delta_{ap}^{rs} = vq_a(t)$$

$$\sum_{rs} xr_{ap}^{rs}(t) \delta_{ap}^{rs} = xr_a(t), \sum_{rs} xq_{ap}^{rs}(t) \delta_{ap}^{rs} = xq_a(t)$$

여기서, δ_{ap}^{rs} 는 기종점 rs 간 경로 p 에 속한 링크 a 를 이용하면 1, 그렇지 않으면 0인 이변수(Binary variable)이다.

④ 초기조건(Initial condition)

$$xr_{ap}^{rs}(0) = 0, vr_{ap}^{rs}(0) = 0, xq_{ap}^{rs}(0) = 0,$$

$$vq_{ap}^{rs}(0) = 0$$

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 정의하는 모형들에 비해 현실적인 교통류 묘사가 가능하게 된다.

2. 시뮬레이션 교통망부하기법(Simulation Loading Algorithm:SLA)

SLA에서는 각 OD의 경로 교통량에 대한 통행시간을 수학적인 함수식으로 계산하지 않고 시간의 흐름에 따른 시뮬레이션을 통해 계산한다. 교통류의 움직임과 통행시간은 <그림 4>와 같은 과정을 따라 결정된다.

<그림 4>의 (a)는 링크에 진입한 차량이 자유 통행속도로 링크를 주행하는 단계이며, (b)는 주행구간을 통행한 차량이 j 노드 앞에서 $t + \Delta$ 시점에 기존 차량에 수직형태로 합류하는 단계를 나타내고 있다. 실제 도로상에서는 차량이 링크 구간에서 지체하게 되지만 본 연구에서 적용하는 수직형 대기행렬모형에서는 이를 대기구간에서 지체하는 것으로 가정한다. 따라서 주행구간에서는 차량들이 자유주행속도로 이동하고 지체는 대기구간에서 발생하는 것으로 설정한다. 이런 방법의 특징은 차량의 대기지체를 대기행렬이론에 의해 쉽게 표현할 수 있으며 FIFO규칙을 보다 손쉽게 만족시킬 수 있다는 장점이 있어 수직형 대기행렬을 적용하는 대부분의 연구들이 이 방법을 사용하고 있다(Drissi-Kaitouni et al., 1992; Kuwahara · Akamatsu,1997; Akamatsu, 2000; Li Jun et al., 2000). 그림(c)는 해당 차량군의 일부가 다음 링크로 유출하는 단계이며, <그림 4(d)>는 나머지 차량이 완전히 유출된 후 다음 링크구간을 주행하는 단계를 표현하고 있다. 이와 같은 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 보조(auxiliary) 값들이 결정된다. SLA의 구체적인 계산과정은 다음과 같다.

[Step1] Initialization

(1.1) 초기값 설정

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

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

[Step2] Queue inflow calculation

- (2.1) 주행구간 상태방정식을 이용하여 $xr_{ap}^{rs}(t)$ 계산
- (2.2) 각 $f_p^{rs}(k)$ 에 대해 각 링크의 종점노드에 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

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

[Step3] 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) 상태방정식을 이용하여 $xq_{ap}^{rs}(t)$ 갱신
- (3.3) $vq_{ap}^{rs}(t)$ 계산(아래 설명참조)
- (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

[Step4] 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,

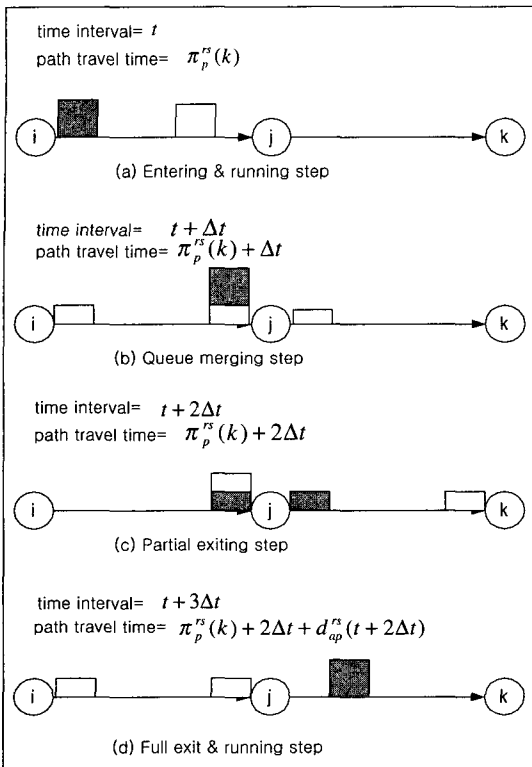
$$\pi_p^{rs}(k) = \pi_p^{rs}(k) + \Delta t$$
 - ② $vq_{ap}^{rs}(t)$ 가 유출하는 경우,

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

[Step5] 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 시뮬레이션종료.
- (5.3) $t = T$ (분석 최종시간)인 경우 또는 더 이상 진입교통량 $ur_{ap}^{rs}(t)$ 가 없는 경우, 시뮬레이션 종료. 그렇지 않으면, $t=t+1$ 로 설정한 뒤(Step 2)로 진행.

여기서, $\pi_p^{rs}(k)$ 는 k 시간대에 출발한 차량(실제로는 Packet)이 기종점 rs 간의 경로 p 를 이용할 때, 자신이 위치한 지점까지 통행하는데 소요된 시간이다. 따라서, [Step2]의 (2.3)에서 새로운 경로 통행시간을 계산



〈그림 4〉 시뮬레이션 부하과정(SLA)

할 때, 이전시간대까지 통행한 경로 통행시간 $\pi_p^{rs}(k)$ 에 해당링크를 통행한시간 t_a 을 더해서 구할 수 있다. 계산과정의 (3.1)은 상류부 링크로부터 유입하는 교통량과 현재 링크의 기점노드에서 통행을 시작하는 교통량을 합하는 링크 유입 교통량을 계산하는 식이며, (4.2)는 단위 시간대 동안 유출가능한 차량대수와 대기행렬내의 차량대수를 비교해 지체시간을 계산하는 식이다.

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 Δt 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 유출율 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)]

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

따라서, 종점 s 로 진행되는 교통류의 유출율은 다음과 같이 계산된다.

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

위 식은 다시 아래와 같이 변형하였다.

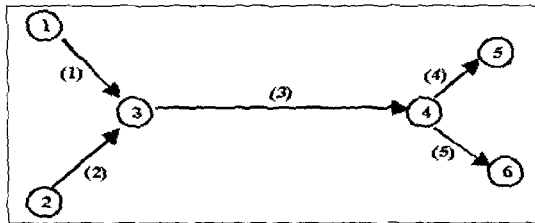
$$vq_{ap}^{rs}(t + d_{ap}^{rs}(t)) = \frac{uq_{ap}^{rs}(t)}{uq_a(t)} vq_{a, \max}(t + d_{ap}^{rs}(t))$$

위 식에서 $uq_a(t)$ 는 각 시간대별로 $uq_a = \sum_{rsp} uq_{ap}^{rs}(t)$ 를 합하여 계산하면 된다.

IV. 모형의 평가

1. 입력자료

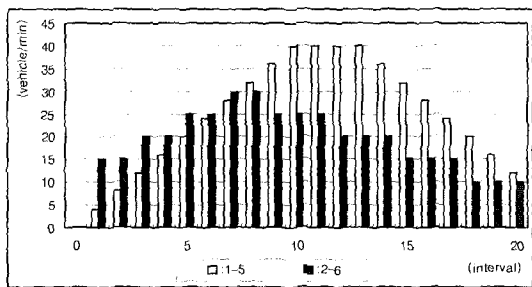
본 장에서는 SLA모형을 적용한 수직형 대기행렬 모형과 INTEGRATION모형을 비교하고자 한다. INTEGRATION모형은 1980년대 중반에 차량 시뮬레이션과 통행배정모형을 결합하여 개발한 모형으로 교통류이론의 로직을 그대로 모형에 이용하고 있다. 모형내에서 차량은 개별적으로 표현되며, 추종이론(Car-following theory)에 따라 링크상을 이동하며, 경로선택은 통행배정과정을 통하여 이루어진다. 최근에는 차량의 움직임을 표현하기 위하여 추종이론외에 차로변경(Lane-change)로직과 동적 통행배정과정이 추가되어 실시간 차량행태와 ITS사업의 평가 등에 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 패킷에 기초하여 교통류를 표현하기 때문에 이와 유사한 형태의 상용화된 모형이 없기 때문에 본 연구의 모형과 비교적 유사할 것으로 판단되는 INTEGRATION모형을 비교 대상으로 고려하였다. 또한, 본 연구에서는 수직형 대기행렬모형의 경우, 유입제한 없이 유출제한만을 사용하였다. 사용된 교통망은 〈그림 5〉와 같으며 ()내 숫자는 링크번호를 나타낸다. 각 링크에 대한 입력자료는 〈표 1〉에



〈그림 5〉 예제 교통망

〈표 1〉 링크 입력자료

링크 번호	길이 (km)	주행속도 (km/h)	유입용량 (대/60sec)	유출용량 (대/60sec)
1	3.0	70	-	10
2	3.0	70	-	10
3	4.0	70	10	10
4	1.5	70	10	10
5	1.5	70	10	10



〈그림 6〉 시간종속적인 OD분포

나타나 있다. 교통망에 부하되는 기종점 교통량은 두 개로서 각각 1→5와 2→6 사이에 20분간 부하되는데 기종점 통행량의 시간대별 분포는 〈그림 6〉과 같다. 모형의 최소 분석시간은 1분으로 설정하였으며, 링크 1과 2의 경우 교통량 부하를 위해 C^m 의 값을 무한대의 값으로 설정하였다. 링크의 유출용량 $v_{a, \max}(t)$ 는 시간당 600대(10대/분)로 가정하였으며, 이값은 실제 교차로나 링크 합 분류부에서 포화 교통류율의 실측을 산정해야 될 값이다.

2. 결과분석

본 연구에서 개발한 모형과 INTEGRATION모형과의 결과비교는 다음과 같다. 두 모형간에는 개발배경과 환경(초기값의 설정 등)이 서로 다르기 때문에 정확히 서로를 비교하기는 어려운 측면이 있었다. 따라서, 전

체적인 패턴측면에서의 비교만이 의미를 갖을 수 있다.

1) 교통량-밀도 관계

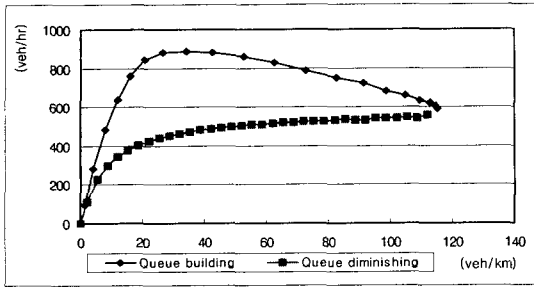
〈그림 7〉은 링크1에 대하여 본 연구에서 제시한 수직형 대기행렬모형과 INTEGRATION모형에서 도출된 교통량-밀도관계를 보이고 있다. 각 그림은 대기행렬이 생성하는 단계와 소멸되는 단계로 구분하여 표현하였는데, 전체적으로 두 모형에서 나온 결과가 매우 유사함을 알 수 있다. 그림에서 보듯이 대기행렬이 생성하는 곡선과 소멸되는 곡선이 동일하지 않으며, 이는 앞에서 설명한 교통류의 비가역성을 나타내고 있다. 두 모형에서 최대교통류와 최대밀도값에 약간의 차이가 있는데, 이는 교통류를 표현하는 방법이 각각 다르기 때문이다. 즉, 본 연구에서는 교통류를 패킷(Packet)으로 표현하고 INTEGRATION에서는 개별차량단위로 표현하고 있다. 〈그림 8〉는 링크3에 대한 교통류-밀도 관계를 보여주고 있는데, 링크1에 비해 좀 더 복잡한 형태를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 전체적인 패턴은 유사하나, 수직형 대기행렬 모형의 최대 교통량이 상대적으로 큰데, 이 역시 교통류의 표현방식에 기인한다. 또한, INTEGRATION에 비해 본 연구의 모형이 전체적으로 변동(Fluctuation)이 크게 나타나고 있는데, 이는 INTEGRATION모형의 경우, 차량 1대를 대상으로 추종이론을 기초로 분석하는데 반해, 본 연구는 차량 여러 대를 하나의 패킷(각 시간대별 OD통행량을 하나의 packet로 설정)으로 분석함에 따라 교통량-밀도 관계곡선이 부드럽지 않게 나타나고 있다.

2) 속도-밀도 관계

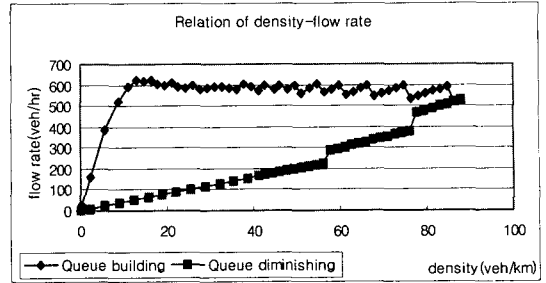
〈그림 9〉와 〈그림 10〉은 각기 링크1과 링크3의 속도-밀도 관계를 나타내고 있다. 이들 역시 전체적으로 매우 유사한 패턴을 보이고 있으며, 비가역성도 보여주고 있다. 그러나 최대값에는 서로 차이가 있음을 알 수 있다. 여기서 하나 관심 있는 사항은 INTEGRATION의 경우, 대기행렬이 생성하는 구간의 속도-밀도 곡선은 합리적이나, 대기행렬이 소멸되는 구간의 속도-밀도 곡선은 비현실적인 결과를 보이고 있다는 점이다.

3) 통행시간분포

〈그림 11〉은 교통량과 통행시간간의 관계를 보여주고 있다. 그림에서 보여주는 가장 중요한 특징은 후

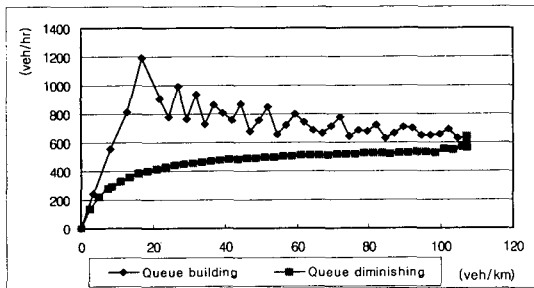


(a) 수직형 대기행렬 모형

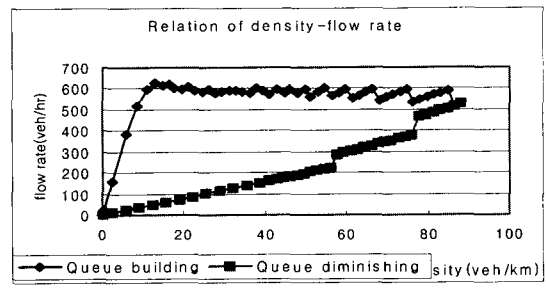


(b) INTEGRATION

〈그림 7〉 링크1의 교통량-밀도 관계

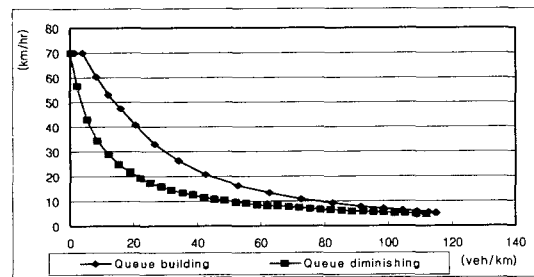


(a) 수직형 대기행렬 모형

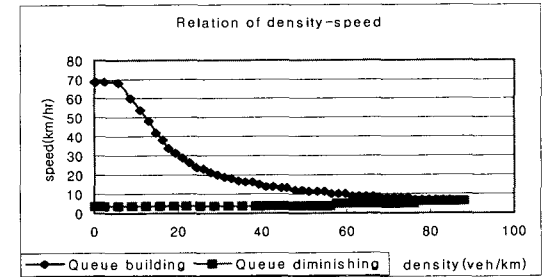


(b) INTEGRATION

〈그림 8〉 링크3의 교통량-밀도 관계

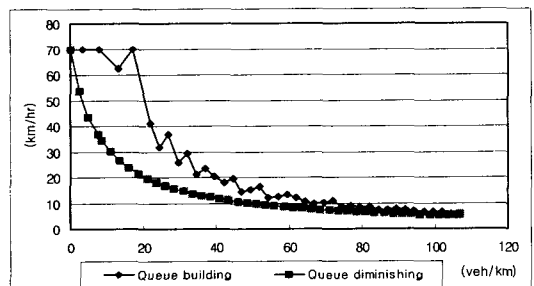


(a) 수직형 대기행렬 모형

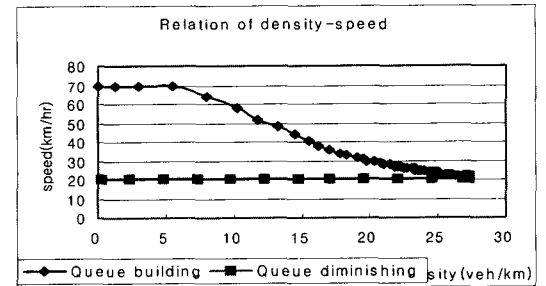


(b) INTEGRATION

〈그림 9〉 링크1의 속도-밀도 관계



(a) 수직형 대기행렬 모형

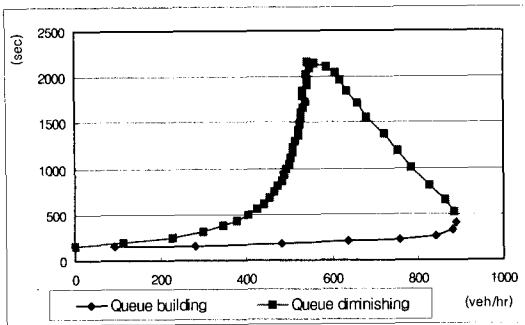


(b) INTEGRATION

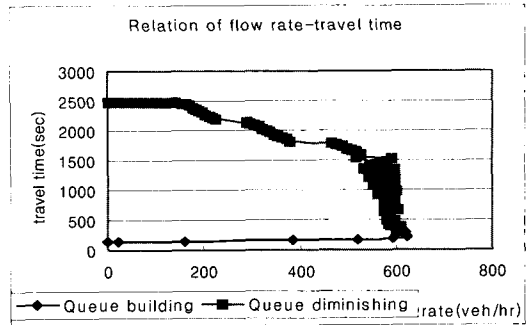
〈그림 10〉 링크3의 속도-밀도 관계

굴성(Backward turn)이다. 통행배정모형에서 사용되는 비용함수는 이런 교통류 특성을 고려하지 못하고 있으나 실제 교통류에서는 빈번히 나타나는

현상으로 통행배정모형, 특히 동적 통행배정모형에는 이를 고려해야 함을 알 수 있다. 여기서 하나 유의할 점은 대기행렬 생성시(Queue building)의

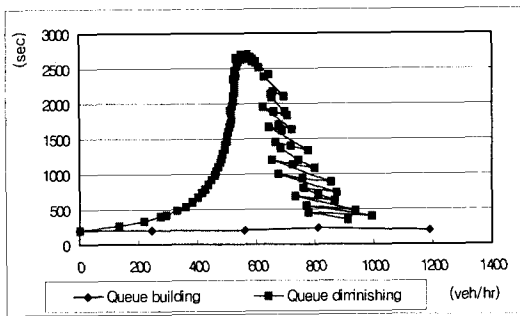


(a) 수직형 대기행렬 모형

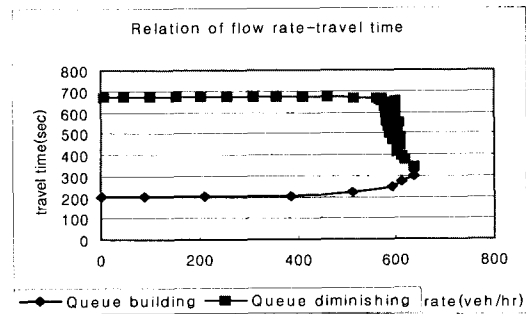


(b) INTEGRATION

<그림 11> 링크1의 통행시간



(a) 수직형 대기행렬 모형



(b) INTEGRATION

<그림 12> 링크3의 통행시간

통행시간 증가량에 비해 대기행렬 감소시 (Queue diminishing)의 통행시간 증가량이 상당히 크다는 것이다. 이는 일반적으로 차량이 극심한 정체를 겪고 난 후, 해소되는 과정에서 더 많은 시간이 소요된다는 교통류이론과 통하며, 최근 Carey et al. (2002)가 이를 수학적으로 보여주었다. 또 다른 특징은 다중성으로 하나의 교통량에 다수의 통행시간이 존재하는 것으로 <그림 12>는 이를 명확히 보여주고 있다.

V. 결론

본 연구에서는 동적 통행배정모형에서 동적 통행시간을 계산할 수 있는 교통류 부하모형을 개발하고 개발된 모형의 교통류특성을 상용 프로그램인 INTEGRATION과 비교하였다. 이는 실제 교통류에서는 후굴성, 비가역성 그리고 다중성등의 특성이 나타나고 있는데, 기존 비용함수 형태로는 이를 표현할 수 없어 이를 고려할 수 있는 모형의 개발이 요구되어 왔기 때문이다. 본 연구에서는 이를 패킷에 기초한 수직형 대기행렬모형으로 개발하였으며, 간단한 예제 교통망을

대상으로 평가한 결과, Messo-sopic 모형임에도 불구하고 교통류에서 나타나는 여러 특성들을 잘 표현하고 있었다. 또한, INTEGRATION모형과 비교한 결과, 두 모형간에는 개발배경과 환경이 서로 다르기 때문에 정확히 서로를 비교하기는 어려운 측면이 있었으나, 서로 유사한 교통류 패턴을 보여주고 있음을 알 수 있었다.

개발모형의 현실적인 성능을 평가하기 위해서는 실제 조사자료나 현실을 잘 묘사하는 모형으로 부터 획득한 결과와의 통계적인 적합성 검증이 요구되나 이를 수행하지 못한 것이 본 연구의 한계로 이에 대해서는 향후 연구로 남아 있다.

참고문헌

1. Akamatsu T. (2000) "A Dynamic Traffic Equilibrium Assignment Paradox", Transportation Research 34B, pp.515~531.
2. Carey M. (1986) "A constant qualification for a dynamic traffic assignment model.

- Transportation Science", 20, pp.55~58.
3. Carey M.(1992) "Nonconvexity of the dynamic traffic assignment problem", Transportation Research. 26B, pp.127~133.
 4. Carey M., M. McCartney(2002) "Behaviour of a whole-link travel time model used in dynamic traffic assignment", Transportation Research 36B, pp.83~95.
 5. Chen H. K.(1999) Dynamic travel choice models, Springer.
 6. Daganzo C. F.(1994) "The cell transmission model : A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory", Transportation Research 28B, pp.269~287.
 7. Drissi-Kaitouni Omar, Hameda-Benchekroun Abdelhamid(1992) "A Dynamic Traffic Assignment Model and a Solution Algorithm", Transportation Science. 26, pp.119~128.
 8. Friesz T. L., Luque F. J., Tobin R. L. and Wie B. W.(1989) "Dynamic network traffic assignment considered as a continuous time optimal control problem", Operations Research, 37, pp.893~901.
 9. Friesz T. L., Bernstein D., Smith T. E., Tobin R. L. and Wie B. W.(1993) "A variational inequality formulation of the dynamic network user equilibrium problem", Operations Research, 41, pp.179~191.
 10. Jayakrishnan R., Wei K. Tsai, Anthoeny Chen.(1995) "A dynamic traffic assignment model with traffic-flow relationships", Transportation Research. 3C, pp.51~72.
 11. Kuwahara M., Akamatsu T.(1997) "Decomposition of the reactive dynamic assignments with queues for a many-to-many origin destination pattern", Transportation Research. 31B, pp.1~10.
 12. Lam, W. H. K., Huang, H. J.,(1995) "Dynamic user optimal traffic assignment model for many to one travel demand", Transportation Research 29B, pp.243~259.
 13. LeBlanc L. J. and Boyce D. E.(1986) "A bilevel programming algorithm for exact solution of the network design problem with user-optimum flows", Transportation Research, 20B, pp.259~265.
 14. Li Jun, Okitsugu Fujiwara, Shogo Kawakami (2000) "A Reactive Dynamic User Equilibrium Model in Network with Queues", Transportation Research. 34B, pp.605~624.
 15. Lo H. K., Szeto W. Y.(2000) "Properties of a Cell-based dynamic traffic assignment model". TRB anual meeting.
 16. Merchant D. K. and Nemhausser G. L. (1978a) "A model and an algorithm for the dynamic traffic assignment problems", Transportation Science. 12, pp.183~199.
 17. Merchant D. K. and Nemhausser G. L. (1978b) "Optimality conditions for a dynamic traffic assignment model", Transportation Science. 12, pp.200~207.
 18. Ran B., Boyce D. E.(1996) "Modeling dynamic transportation networks", Springer.
 19. 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. 31B, pp.277~290.
 20. Wie B. W., Friesz T. L. and Tobin R. L. (1990) "Dynamic user optimal traffic assignment on congested multidestination networks", Transportation Research, 24B, pp.431~442.
 21. Wie B. W., Tobin R. L., Friesz T. L., Bernstein D.(1995) "A discrete time, nested cost operator approach to the dynamic network user equilibrium problem", Transportation Science 29(1), pp.79~92.
- ✉ 주 작 성 자 : 임강원
 ✉ 논문투고일 : 2002. 3. 26
 논문심사일 : 2002. 5. 20 (1차)
 2002. 5. 28 (2차)
 심사판정일 : 2002. 5. 28
 ✉ 반론접수기간 : 2002. 10. 30