

누적곡선을 이용한 통행시간 추정방안에 관한 연구¹⁾

A Study on the presumption of travel time based on the cumulative curve method

김 승 일

((주)동부엔지니어링 교통 R&D 연구실)

목 차

- | | |
|--------------------------|-------------------------------|
| I 서론 | 2. 누적곡선을 이용한 밀도, 속도, 시간의 계산방안 |
| II 기존기법의 고찰 | 3. 실용적 알고리즘의 개발 |
| 1. 정적 통행배분모형의 고찰과 한계 | IV 정립된 기법의 적용 |
| 2. 동적통행배분모형의 고찰 | 1. 모형의 수행 |
| III 누적곡선을 이용한 통행시간 추정 방안 | 2. 실측자료와의 비교분석 |
| 1. 통행시간 추정의 기본방향 | V 결론 및 향후 연구과제 |

ABSTRACT

정적 통행배분모형은 도로 건설 등 공급부문에의 적용은 가능하나 통행량 및 혼잡의 시간적 공간적 변화를 고려하지 못하여 수요관리에서는 교통량 및 비용에 대한 관측치와 모형의 결과치가 상이한 문제가 있다. 이에 동적배분모형의 다양한 접근방법이 시도되고 있는데 그 중 Simulation기법을 개발하고자 하였다.

모형은 개별차량의 시공간상 움직임을 표현하고자 절대시간이 가장 이른 차량순으로 시뮬레이션을 함으로써 선입선출(FIFO)을 가능하게 하였다. 각 차량별 지체시간의 계산은 대기행렬이론을 기초로 한 누적곡선법을 적용하여 도출하였다.

개별차량 Simulation은 시간축으로 확장된 연속류 Network상에서 각 차량의 도착 및 출발할 노드와 시간대를 결정하면 모든 지점에서 누적도착, 출발곡선을 그릴 수 있으며 이를 통해 도로구간에 있어 시간대별 통행시간, 밀도, 속도 등을 파악할 수 있다. 또한 합류부의 용량와해현상과 분류부의 용량변화현상 제약 및 Queue길이 제약이 이루어지도록 하였다.

개발된 모형의 검증은 영동대교 복단 강변도로 진출입부 자료를 실측하여 사용하였다. 모형은 합류부 용량와해의 적용 전과 후의 결과를 각각 실측치와 비교하였다. 용량와해현상을 적용한 모형에서 MAPE 10%미만의 우수한 예측력을 보였다. 이는 누적곡선을 이용한 Simulation모형이 현실에 가까움을 의미하는 것이며, 합류부 용량와해현상의 관계식을 보다 정교하게 도출하고 분류부에도 이를 적용한다면 모형의 예측력은 더욱 향상될 것으로 보인다.

1) 1998년 홍익대학교 대학원 석사학위 논문

I 서 론

도시교통체증과 그로 인한 직·간접 비용의 증가는 심각한 도시문제로 대두되고 있으며 특히 서울시는 연간 1조 4천억원²⁾, 6대도시는 8조 6천억원³⁾의 혼잡비용을 부담하고 있는 실정이다. 이러한 문제의 해결을 위한 다양한 방법이 모색되고 있는데 교통류 시뮬레이션 모형을 활용한 교통계획기법이 여러 방면으로 연구되고 있다. 이는 최근 활발히 진행되고 있는 지능형 교통체계(ITS, Intelligent Transportation Systems)나 동적 배분(Dynamic Assignment)분야에서 매우 중요한 비중을 차지하고 있다. Simulation 모형은 통행시간 예측과 실시간 경로안내 등에 이용될 장래 통행시간 자료의 근거를 제시하며, 도시고속도로의 정체현상의 감지, 미터링 등으로 변화될 교통흐름의 현실에 가까운 예측도 가능하다.

동적통행배분모형의 수학적 모형식과 해의 존재성(existence)와 유일성(Uniqueness)등을 증명 그 결과는 만족스럽지 못하다.⁴⁾⁵⁾ 본 연구에서는 누적곡선법을 이용한 시뮬레이션 기법을 이용하여 도시고속도로의 혼잡상황을 나타내는 교통량, 통행시간, 밀도 등의 시간적 변화를 나타낼 수 있는 방안을 제시하고 실용적 알고리즘을 개발하여 그 유용성을 검증하는 것을 그 목적으로 한다.

II 기존 기법의 고찰

1. 정적 통행배분기법의 한계점

정적 통행배분모형은 정적 통행수요로 도로망 상의 최단경로에 배분하여 균형교통량을 도출하는 과정이며 한계점은 다음과 같다.⁶⁾

- ① 정적 통행수요의 사용 : 교통량과 혼잡의 시간적 변화와 출발시간 변동과 같은 행태를 고려할 수 없어 출근시차제와 교통시설 변경에 따른 출근시간 변경 등의 영향을 고려할 수 없다.
- ② 정적 최단경로 사용 : 정적 통행배분의 최단경로 탐색은 시간축 최단경로 탐색이 아니라 안정상태 교통류 가정에 근거한 것이므로 현실적 최단경로를 선택할 수 없다.
- ③ 선입선출의 무시 : 도로망에서 먼저 진입한 차량은 나중에 진입한 차량보다 먼저 구간을 빠져나간다는 개념이 선입선출이다.⁷⁾ 정적 통행배분에서는 선입선출을 고려하지 못하고 있다.

2. 동적 통행배분모형의 고찰

크게 교통류에 기초(flow based)한 모형과 차량에 기초(vehicle based)한 모형으로 분류된다. 교통류 기초모형은 거시적 교통량 방정식에 기초를 두어 대규모 교통망에 적합하며 차량기초모형은 미시적 차량의 움직임에 기초한다. 이는 다시 차량에 기초한 모의실험모형과 교통류에 기초한 수리계획모형, 최적제어모형, 휴리스틱모형, 확률적 모형 등이 있다.

1) 모의실험모형

모의실험모형은 반복적인 통행배정의 틀 안에서 시뮬레이션을 통하여 동적인 행태를 추정하는 것으로 다른 방법들에 비해 수학적 속성(Mathematical property)이 부족한 면이 있다. 그러나 첨단교통체계(ITS)의 효과분석이나 교통제어전략을 쉽게 평가할 수 있는 장점이 있다. 또한 교통류 관계로부터 동적인 통행행태를 더욱 세밀히 묘사할 수 있다. 이 분야의 최초 연구는 Yager(1971)

2) 교통개발연구원, 교통혼잡비용 예측연구, 1992. 12.

3) 교통개발연구원, 교통연구속보, 1994, 11 pp 2-3

4) Smith, M. J., The existence of a time-dependent equilibrium distribution of arrivals at a single bottleneck, Transpn. Sci. Vol.21, 1984

5) Daganzo C. F., The uniqueness of a time-dependent equilibrium distribution arrivals at a single bottleneck, Transpn. Sci. Vol.19, 1985

6) 윤일수, 분할배정원칙을 이용한 동적 통행배정모형 개발, 한양대학교 석사논문, 1994.12.

7) C.F. Newell, Application of Queueing Theory, Chapman & Hall, pp 86-90

이었는데 그는 Wardrop의 사용자 균형원리에 의거 시간에 따른 수요변화와 대기행렬의 변화를 모델화하였다. 이 모형은 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 네트워크 상의 교통상황을 묘사한 후, 통행비용 최소화를 위하여 아래 그림과 같이 반복적인 절차를 통하여 균형상태에 접근하게 된다.⁸⁾

2) 최적제어이론에 의한 방법

최적제어이론(optimal control theory)은 가로의 신호제어나 고속도로의 Ramp metering control에 적용되어 왔으며 동적 교통네트워크에도 이 방법을 적용할 수 있게 되었다. 기존에 사용되던 최적제어이론(optimal control theory)의 목적은 물리적 제약조건을 충족시키고 동시에 어떤 목적식(performance criterion)을 최대화 또는 최소화하는 최적제어방안을 결정하는 것이다. 이러한 최적제어모형은 정적문제 (비선형 프로그램 이론을 기초로 정립된) 해결에 사용되는 최적화 모형과 유사성이 많다.

3) 수학적 프로그래밍을 이용한 방법

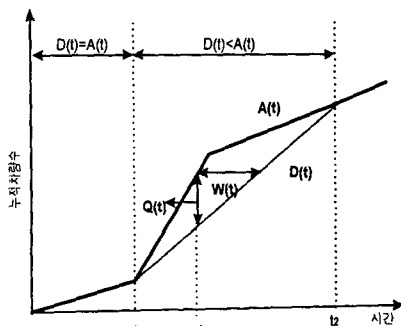
Merchant와 Nemhauser등에 의해 시작되었으며 1987년 Carey는 이를 개선하여 convex 비선형 모형으로 재구성하였다. Mahmassani와 Chang에 와서 중요한 발전이 있었으나 몇 개의 출발지를 갖지만 단지 1개의 도착지에 제한되었다. Ben-Akiva, de Palma, Kanaroglan은 몇 개의 평행한 경로를 가진 단일 출발지-단일 도착지를 고려하였고, Newell은 다른 통행비용 계수를 가진 몇 부류의 통행자들을 포함하는 상황을 고려하였다. Smith⁹⁾는 단일 병목지점을 갖는 가상 도로망에서 시간-의존 균형 배분의 존재성을 증명하였고 Daganzo¹⁰⁾는 유일성을 증명하였다. Ben-Akiva¹¹⁾는 단순도로망에서 출발시간과 도로망에서 시간 변화를 고려할 수 있는 동적 도로망 균형을 제시하였다. 그 외 Boyce와 Hamerslg, Carey가 제약식을 제시하였다. Smith은 혼잡한 용량제약 도로망에서 동적 사용자 균형을 계산할 수 있는 새로운 동적 통행배분모형을 제시하였다.

III 누적곡선을 이용한 통행시간 추정 방안

1. 통행시간 추정의 기본방향

본 연구는 누적곡선법을 이용하여 개별 차량의 움직임을 최대한 반영한 직관적 Simulation 모형을 개발하고자 한다. 개별차량의 진행에 따른 지점별 누적출발·도착곡선을 이용한 차량의 지체시간과 통행량을 도출하는 Simulation모형의 기본이론은 다음과 같다.

1) 누적곡선을 이용한 교통류 이론



<그림> 용량초과지점의 누적곡선

누적곡선법은 대기행렬 이론(Queueing theory)에서 볼 수 있다. 가로축은 경과시간을, 수직축은 누적차량대수를 나타내며 교통수요가 일시적으로 용량을 초과하는 경우를 나타낸다. 누적도착곡선($A(t)$)의 기울기는 교통수요를 나타내며 누적출발곡선($D(t)$)의 기울기는 용량을 나타낸다.¹²⁾

$A(t)$: 누적도착곡선 $D(t)$: 누적출발곡선

$Q(t)$: t시점의 대기차량수

$W(t)$: t시각 직후 차량의 대기시간

$t_1 \sim t_2$: 지체발생시간

8) 임용택, 동적통행배정모형의 비교연구, 서울시정연구 제5권 제1호, 1997.9 pp 83-84

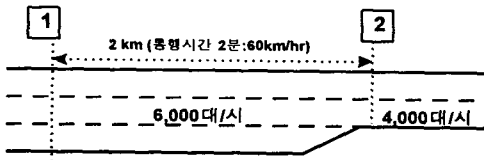
9) Smith, M. J., The existence of a time-dependent equilibrium distribution of arrivals at a single bottleneck, Transpn. Sci. Vol.21, 1984

10) Daganzo C. F., The uniqueness of a time-dependent equilibrium distribution arrivals at a single bottleneck, Transpn. Sci. Vol.19, 1985

11) Ben-Akiva, M., Dynamic network equilibrium research, Transn. Res., Vol. 19A, 1985

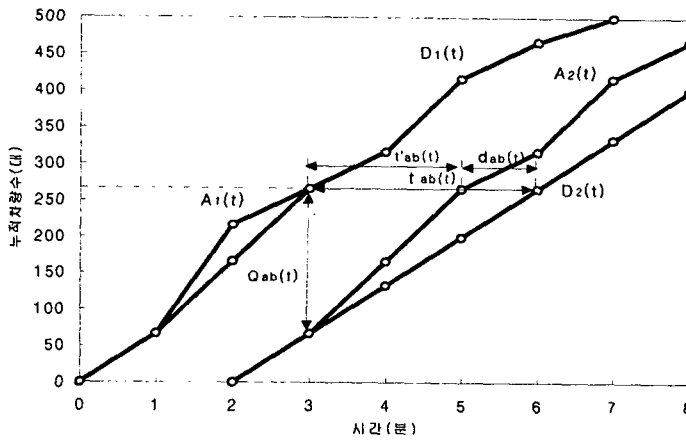
12) Adolf D. May, Traffic Flow Fundamentals, Prentice Hall. pp 338-360

2) 병목구간의 적용



<그림> 병목구간의 기하구조

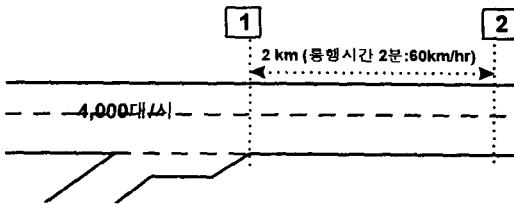
왼쪽과 같이 연속된 두 지점에서 차선감소, 유고 등으로 인한 병목현상이 생겼을 때의 연속된 누적곡선을 표현하면 다음 그래프와 같다. 1번지점에서 수요가 1분단위로 변화할 때 누적 도착량은 곡선 $A_1(t)$ 이며 도착량이 용량을 초과할 때 6,000(대/시)의 기울기로 누적 출발곡선 $D_1(t)$ 이 작성된다.



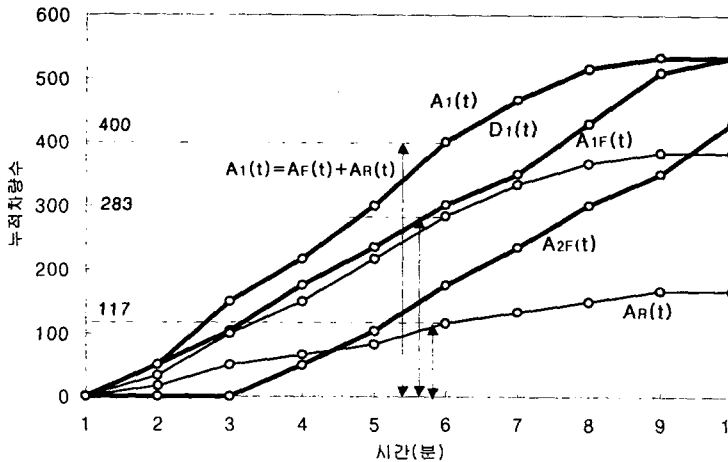
$Q_{ab}(t)$: 시간에 a - b 지점간의 존재차량수
 $t_{ab}(k)$: k번째 차량의 a - b 지점간 통행시간
 $t'_{ab}(k)$: k번째 차량의 a - b 지점간 자유통행시간
 $d_{ab}(k)$: k번째 차량의 a - b 지점간 지체시간
 상류인 1번 지점에서는 대부분 도착량과 출발량이 같게 나타나고 ($A_1(t) = D_1(t)$), 1번 지점을 통과한 차량 ($D_1(t)$)은 2번 지점으로 전파되어 도착량 ($A_2(t)$)으로 나타나게 되며 병목인 2번 지점의 지체를 심각하게 유발함을 확인할 수 있다.

<그림> 병목구간의 연속 누적곡선

3) 합류구간의 적용



1번지점은 병목이 되어 대기행렬을 발생시키며 $A_1(t)$ 와 $D_1(t)$ 간의 면적은 1번 지점을 지나는 차량의 총지체를 나타낸다. 대기행렬이 얼마나 본선과 램프로 나눌지의 여부는 상류지점에 영향을 끼칠 경우가 있기 때문에 우선권의 법칙(FIFO : First In First Out)이 적용하여 분할한다.¹³⁾



1번지점과 2번지점간의 통행시간은 2분으로 1번지점으로부터의 출발량 ($D_1(t)$)이 2분만큼 평행이동하여 2번지점의 도착량 ($A_2(t)$)가 됨을 볼 수 있고 지체시간과 통과교통량도 알 수 있다.

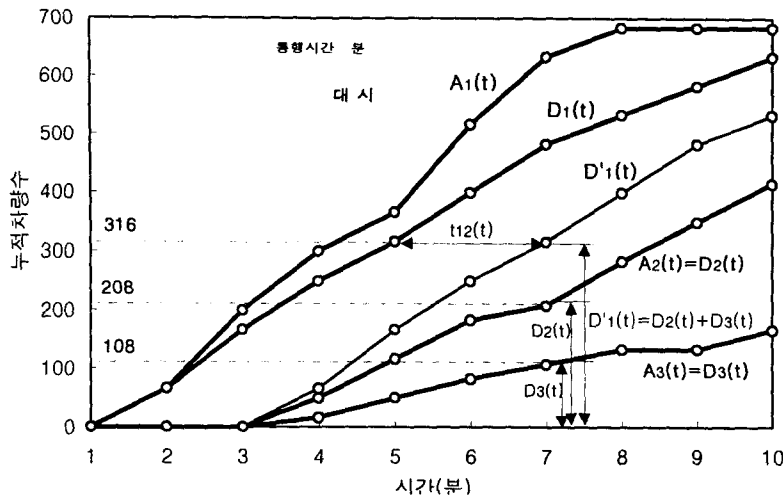
$A_{1F}(t)$: 1번지점의 본선구간
 누적도착교통량
 $A_{1R}(t)$: 1번지점의 램프구간
 누적도착교통량

<그림> 합류구간의 연속 누적곡선

4) 분류구간의 적용

왼편 그림과 같은 분류부에 접근하는 차량들은 각각 2번과 3번의 두가지 진행방향 중 하나를 택하게 된다. 이 경우 누적도착량은 합류부와 마찬가지로 $A_1(t) = A_F(t) + A_R(t)$ 가 성립하지만 용

13) C.F. Newell, Application of Queueing Theory, Chapman & Hall, pp 86-90



<그림> 분류구간의 연속 누적곡선

량은 단순히 $D_F(t) + D_R(t)$ 라 할 수 없고 방향별 도착량에 따라 가변적이다. 이는 어느 한 쪽으로의 도착량이 용량보다 많을 경우 이러한 단순합산으로는 잘못된 계산결과를 가져올 수 있기 때문이며 FIFO원칙과 방향별 용량에 따라 차량을 진행시켜야 한다. 상세한 과정은 3절에서 기술되었으며, 이를 적용한 다음 그래프에서 보면 1번지점의 누적출발곡선($D_1(t)$)의 기울기가 가변적임을 알 수 있다.

그래프에서 볼 때 1번지점을 통과한 차량들은 2분후 2번과 3번지점으로 전파되는데 $D'_1(t)$ 는 가상의 누적곡선으로 $D_1(t)$ 을 통행시간 2분($t_{12}(t)$)만큼 평행이동시킨 곡선이다. 여기서 $D'_1(t) = A_2(t) + A_3(t)$ 임을 볼 수 있는데 이는 1번지점을 출발한 차량들이 2분후 각각 본선진행 또는 램프로 진출하여 2번과 3번지점으로 나뉘어 도착했음을 나타내는 것이다.

5) Simulation에의 적용방안

앞서 살펴본 합류, 분류, 본선병목구간의 누적곡선의 특성을 시뮬레이션에 적용하면 연속류에 있어 둘 이상의 연속된 지점(Node)의 시간당 교통량, 밀도, 통행시간, 지체시간을 도출할 수 있다.

누적곡선을 연속으로 그려내기 위해선 개별차량에 대한 선입선출(FIFO)이 적용되어야 한다. 본 모형에서는 출발시간 통행수요(Dynamic O-D Matrix)를 개별 차량에 시각을 기억시켜 시간이 이른 순서로 시뮬레이션을 함으로써 이를 가능케 하였다. 한 차량이 지정된 시간 안에 도달할 수 있는 노드를 찾아내어 해당노드의 누적도착량 곡선을 갱신하고 같은 방법으로 모든 차량의 전진 여부를 결정한 후 해당시간대 노드의 용량을 고려 누적출발곡선을 도출해낸다. 이를 전체 연속류 구간에서 반복하면 모든 노드의 누적곡선을 그릴 수 있으며 각 진입램프를 시발점으로 시간에 따라 퍼져가는 차량의 흐름과 시간대별 통행시간, 밀도, 속도를 파악할 수 있다.

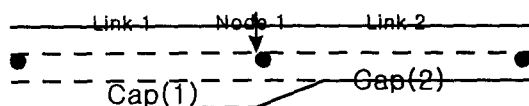
2 누적곡선을 이용한 밀도, 속도, 시간의 계산방안

1) 제약조건

구축하고자 하는 모형에서는 혼잡에 대한 제약조건으로 누적출발곡선과 직접 연관이 있는 지점별 용량과 대기행렬에 의해 제약을 받도록 하였다. 매 시간대 차량 한 대를 전진시킬 때마다 대기행렬의 길이와 용량을 검사하여 배분하도록 한다.

(1) 용량제약

Node 1 지점을 통과하는 유출교통량은 다음 Link 2의 용량을 초과할 수 없으며 Node 1에 도착하는 양도 Link 1의 용량을 초과할 수 없다.



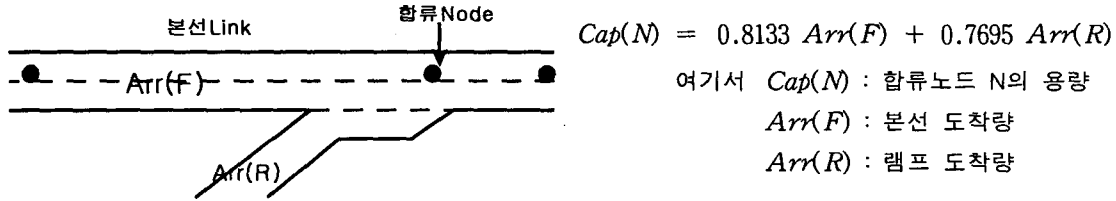
$$Dep(n_1) \leq Cap(l_2) \text{ ----- (1)}$$

$$Arr(n_1) \leq Cap(l_1) \text{ ----- (2)}$$

(2) 합류부의 용량제약

합류부는 특별히 진입램프와 본선의 교통류가 만나 기존의 합류부 용량 저하되는 교통와해현상이 발생한다. 이 현상에 대하여는 많은 연구가 이루어지고 있으며 본 모형에서는 본선유입교통량과 유출교통량의 관계에 의한 용량저하현상을 적용하였다.

이는 본선유입교통류와 램프유입교통류의 관계를 1차 선형식으로 나타낸 것으로 기존연구에서 추정된 계수¹⁴⁾를 다음과 같이 적용하여 용량을 재산정한다.



(3) 대기행렬 길이 제약

그림에서 제약식 (1)에 의해 나가지 못하는 양은 Link 1에 대기행렬로써 생성된다. 이 대기행렬은 Link 1의 길이가 짧다면 대기행렬의 후미가 Link의 길이에 빨리 도달하여 이후 Link 1에 유입되는 양을 제약할 것이다.¹⁵⁾ 본 모형에서는 이러한 경우 배분되는 차량의 시간에 분석단위시간 (Time Slice)만큼 대기시간을 추가하여 다음시간에 진출을 시도하도록 반복한다.

if Queue길이 > Link길이, 해당차량 대기시간 추가

2) 밀도, 속도, 시간의 계산방안

모형의 전체적인 과정은 시간단위를 증가시키면서 Node별 누적도착곡선계산 ($A_i(t)$, 이를 바탕으로 누적출발곡선 ($D_i(t)$)의 도출, 차량별 지체시간의 추가 갱신의 과정을 반복하게 된다.

(1) 누적도착곡선의 계산

누적도착곡선 ($A_i(t)$)의 계산은 매 단위시간마다 모든 차량에 차량마다 절대시간을 기억시켜 이를 정렬하여 차량선택순서를 결정한다. 이는 선입선출을 가능하게 한다. 선택된 차량이 지정된 시간 안에 도달할 수 있는 노드를 찾아내어 해당노드의 누적도착량 곡선을 갱신하고 같은 방법으로 모든 차량의 전진여부를 결정한다. 이 과정에서 대기행렬 길이의 제약이 이루어진다.

(2) 누적출발곡선의 계산

차량진행으로 해당 시간대 내의 모든 Node의 누적도착곡선이 갱신되면 이를 바탕으로 각 Node의 용량에 따른 출발가능량을 도출하고 누적출발곡선을 계산하게 된다. 분류부의 경우 분류부 용량제약과정을 선행하게 된다. 이 과정은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{if } A_i(t) \leq D_i(t) + Cap(i) \text{ 이면 } D_i(t) = A_i(t), \text{ 아니면 } D_i(t) = D_i(t-1) + Cap(i)$$

(3) 차량별 지체시간의 계산

시간대의 각 노드의 누적도착곡선과 누적출발곡선으로 차량별 지체시간을 구할 수 있다.

$A_i(t), D_i(t)$ 의 계산이 끝난 상황에서 $A_i(t), D_i(t)$, $A_i(t-1), D_i(t-1)$ 의 네 점을 구할 수 있다면 비례식을 이용해 각 차량의 지체시간에 해당하는 왼쪽 그림

14) 이탁수, 교통혼잡시 교통와해현상에 관한 연구, 홍익대학교 석사논문, 1996. 12.

15) 박노봉, Flow Simulation 모형개발을 위한 연구, 홍익대학교 도시계획학 석사, 1996.6 pp28

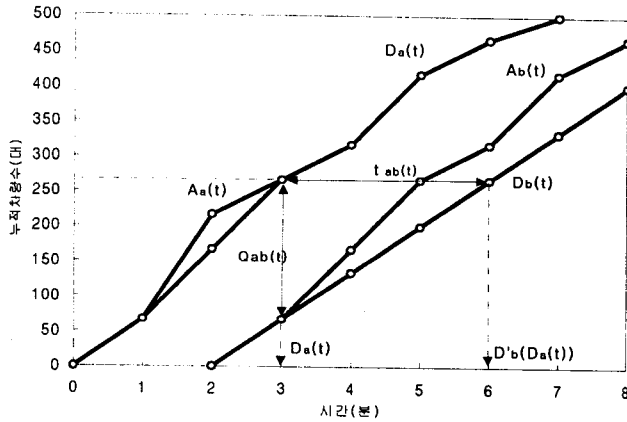
의 화살표의 길이를 구할 수 있다. 각 지체시간은 차량시간에 더해지고, 이를 모든 Node에 반복하여 해당 시간대에 Node에 도달한 차량의 지체시간을 구한다.

$$CarT(k) = CarT(k) + d(k)$$

여기서 $CarT(k)$: k번째 차량의 절대시간, $d(k)$: k번째 차량의 지체시간

(4) 밀도와 통행시간의 계산

모든 과정을 마치면 각 지점(Node)의 누적곡선이 그려지고 밀도와 통행시간을 구할 수 있다.



$$Q_{ab}(t) = D_a(t) - D_b(t)$$

$$k_{ab}(t) = Q_{ab}(t) / (Dist(a, b) * Lane(a, b))$$

$$t_{ab}(k) = D_a(t) - D'_b(D_a(t))$$

여기서 $Q_{ij}(t)$: t시간에 a - b 지점간의 존재차량수

$t_{ab}(k)$: k번째 차량의 a - b 지점간 통행시간

$Dist(a, b)$: a - b 지점간 거리

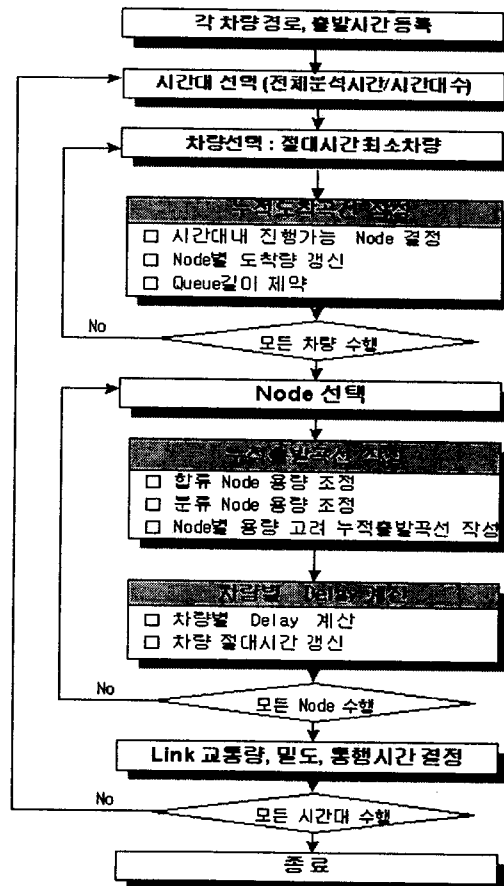
$Lane(a, b)$: a - b 구간의 차선수

$D'_b(k)$: b Node 누적출발곡선의 역함수

<그림> 밀도, 통행시간 계산

3. 실용적 알고리즘의 개발

이상의 과정을 다음과 같은 Flowchart로 정리하여 연속류 Simulation모형을 개발한다.



<그림> Flow Simulation 과정의 개요

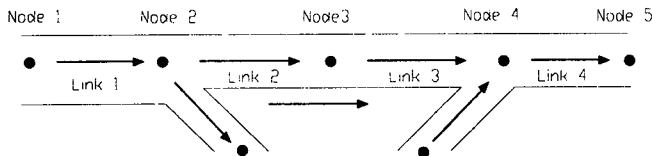
IV 정립된 기법의 적용

1. 모형의 수행

모형의 검증은 합류와 분류가 이루어지는 연속류 구간을 적용시키기 위해 영동대교 북단 동→서 방향 강변도로 약 1KM구간을 선정하여 영동대교 북단의 실측자료와 모형의 결과를 통계적으로 비교하였다.

1) 사례대상의 기하구조 및 수요의 결정

영동대교 북단 북강변도로(서→동)의 유출입지점의 기하구조를 도식화하면 다음과 같다.



<그림> 영동대교 북단 유출입 지점의 기하구조

분석시간은 1분 단위로 30분을 모의실험 하였으며 각 시간대별 수요는 본선유입→본선유출, 본선유입→램프진출, 램프유입→본선진출의 세 가지가 있고 용량보다 많은 양이 되도록 설정하였다. 총 차량 수는 7,638대이다.

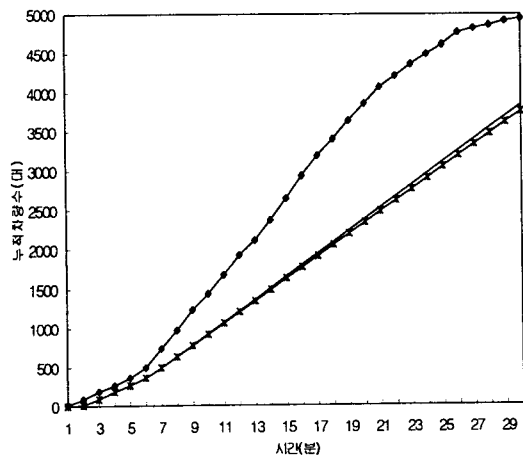
2) 모형을 통한 교통량, 밀도, 통행시간의 산정

모형에 적용하여 누적도착, 출발곡선을 도출한 결과를 그래프화하면 다음 그림과 같다. 4번 Node로의 진입수요는 점차 증가하여 램프의 용량을 초과하게 되면 용량만큼만 통과하여 본선에 도착하게 되고 본선의 교통류와 4번 Node에서 만난다. 이들 교통류의 합이 4번 Node의 용량을 초과할 경우 이는 누적도착곡선이 누적출발곡선을 초과했음을 의미한다.

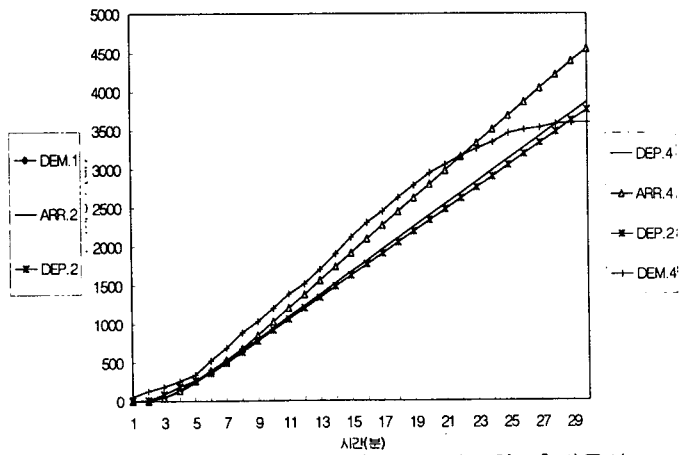
처음 누적도착곡선과 출발곡선의 분리는 4분 후 4번Node 이다. 또한 분류부의 용량저하 현상으로 인하여 2번지점에서 8분 후에 지체가 발생하였으며 분류부로부터 2번 Link로 유입된 교통류는 3차선의 용량감소로 3번 Node에서 9분 후 누적도착, 출발곡선의 분리현상이 일어났다.

다음의 그래프에서 DEM.1은 1번 Node로 유입되는 누적수요를 나타내는 곡선으로 본선유입→램프유출, 본선유입→본선유출 수요의 합과 같다. DEM.4는 진입램프로 4번 Node로 진입하고자 하는 누적수요를 나타낸 곡선이다.

1번 Node의 수요는 용량이상 진출하지 못하고 Dep_1 곡선만큼 유출하게 되며 이는 Arr_2 로 전파된다. Dep_2 곡선은 합류지점인 4번 Node에 도달하여 램프 유입량과 만나게 되고 높은 기울기의 도착곡선 Arr_4 를 형성하였다. 이는 4번 Node의 상류인 3번 Link에서 큰 지체를 발생시킴을 볼 수 있다.



<그림> 2번지점의 수요, 누적도착, 출발곡선



<그림> 4번지점의 수요, 누적도착, 출발곡선

<표> Node별 누적도착, 출발량

단위 : 대

시간 (분)	2번 Node		3번 Node		4번 Node		시간 (분)	2번 Node		3번 Node		4번 Node	
	Arr.	Dep.	Arr.	Dep.	Arr.	Dep.		Arr.	Dep.	Arr.	Dep.	Arr.	Dep.
1	0	0	0	0	0	0	16	2646	1805	1658	1629	1919	1676
2	9	9	0	0	0	0	17	2937	1951	1808	1774	2099	1822
3	86	86	8	8	0	0	18	3190	2097	1950	1914	2277	1968
4	187	187	86	86	47	47	19	3400	2243	2093	2054	2454	2114
5	262	262	186	186	139	124	20	3638	2389	2242	2199	2629	2260
6	364	364	262	262	258	238	21	3860	2535	2389	2342	2807	2406
7	491	491	364	364	396	381	22	4069	2681	2534	2483	2984	2552
8	739	637	491	491	529	509	23	4218	2827	2681	2626	3162	2698
9	972	783	637	633	677	654	24	4367	2973	2828	2769	3337	2844
10	1233	929	782	775	849	800	25	4495	3119	2973	2911	3513	2990
11	1437	1075	927	916	1028	946	26	4613	3265	3121	3055	3690	3136
12	1674	1221	1076	1061	1205	1092	27	4764	3411	3264	3195	3867	3282
13	1923	1367	1223	1204	1383	1238	28	4820	3557	3411	3338	4045	3428
14	2111	1513	1365	1343	1563	1384	29	4860	3703	3557	3480	4219	3574
15	2373	1659	1512	1487	1742	1530	30	4915	3849	3703	3623	4396	3720

Flowrate는 각 Link 하루 Node의 시간대별 진출교통량을 기준으로 산정하며 합류 Node일 경우 진출차량을 상류 Link별로 구분하여 계산함으로써 각 Link의 실제 교통량을 구할 수 있다.

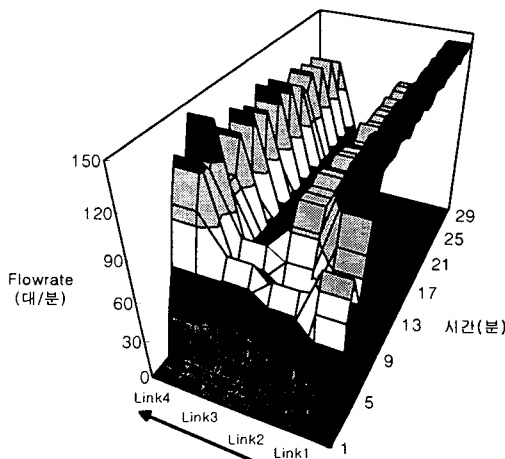
Link 1의 교통량은 본선3차선과 램프1차선의 용량의 합인 146(대/분)만큼 보내야 하나 분류부 용량저하로 이를 모두 진출시키지 못한다. Link 2는 본선교통수요라 할 수 있는 100대 안팎의 교통량을 보내며 지체지점인 Node 4를 벗어난 교통량은 Link 4에서 용량만큼 진출하게 된다.

Link 1은 밀도의 완만한 증가를 보이며 합류부인 Link 3의 혼잡이 상류까지 영향을 미쳐 Link 2의 밀도를 점차 증가시킨다. Link 3의 경우 합류부의 영향으로 통과하지 못한 차량에 의해 밀도가 증가하는데 이는 최대밀도인 160(대/km/lane)를 넘지 않는다. 여기서 최대밀도를 넘은 차량은 Spillback 현상으로 상류부에 영향을 미친다. 각 시간대별로 해당 Link를 대표할 수 있는 통행시간은 모든 차량의 통행시간을 평균하는 방법이 가장 합리적이라 할 수 있다. 그러나 모든 차량에의 적용은 모형수행시간등의 문제가 있으므로 대표차량을 선정해 통행시간을 추정하였다.

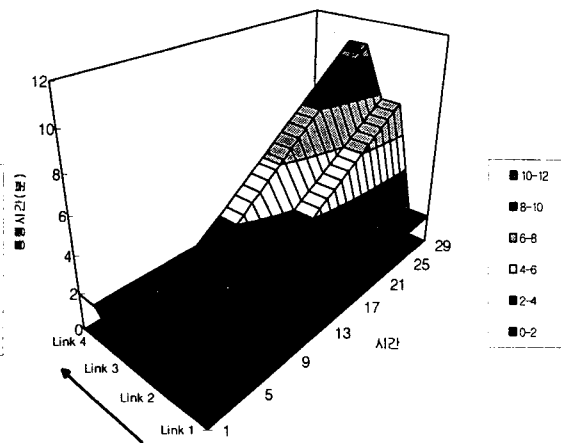
<표> 용량와해적용전후 합류지점 통행시간

단위 : 분

시간(분)	적용 전	적용 후	시간(분)	적용 전	적용 후	시간(분)	적용 전	적용 후	시간(분)	적용 전	적용 후
1	0.50	0.50	9	1.92	2.92	17	3.81	5.81	24	5.41	8.41
2	1.04	1.04	10	2.24	3.24	18	4.16	6.16	25	5.80	8.80
3	1.32	1.32	11	2.62	3.62	19	4.55	6.55	26	6.14	9.14
4	1.91	1.91	12	2.96	3.96	20	4.95	6.95	27	6.52	9.52
5	1.96	1.96	13	2.29	4.29	21	4.30	7.30	28	6.88	9.88
6	1.06	2.06	14	2.72	4.72	22	4.67	7.67	29	6.26	10.26
7	1.25	2.25	15	3.05	5.05	23	5.05	8.05	30	7.63	10.63
8	1.60	2.60	16	3.46	5.46						



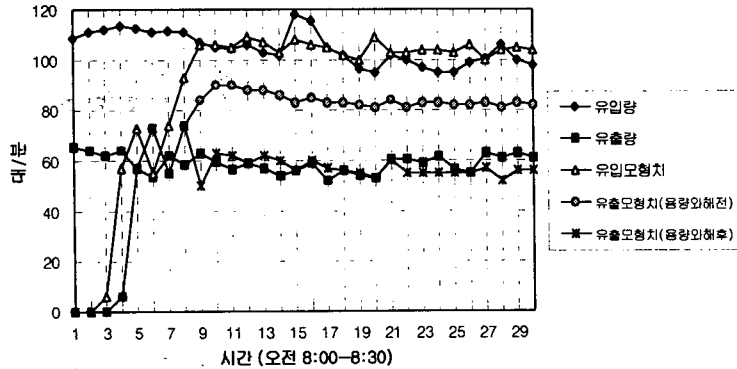
<그림> 시공간상 Flowrate의 변화 (용량와해 적용)



<그림> 시공간상 통행시간의 변화 (용량와해 적용)

2. 실측자료와의 비교분석

모형수행결과의 검증에 위해 실제 영동대교 북단 강변도로 구간의 혼잡시간대 본선유입, 유출 교통량을 조사하였다. 유입량은 2번 Node지점에서, 유출량은 4번 Node지점에서 오전 8:00~8:30의 교통량을 1분단위로 측정하였다. 모형에 의한 계산치는 유입량은 2번Link의 Flowrate를, 유출량은 3번 Link의 Flowrate를 적용하였다.



<그림> 실측치와 모형치의 비교

은 분석시간대 기준에 존재하던 차량들의 유출로 초기부터 높은 수치를 나타낸다. 따라서 통계검 증은 이러한 현상이 사라진 시점부터 자료화합이 타당하다고 보아 7:05 부터의 유입, 유출자료 총 52개를 적용하여 평균절대백분율오차(MAPE)는 다음 표와 같다.

<표> 용량외해 전후 모형치의 검증

	용량외해 적용 전	용량외해 적용 후
평균절대오차 (MAE)	12.89	4.47
평균절대백분율오차 (MAPE)	24.79	8.60

합류부 용량외해현상 적용 전과 후의 MAPE는 각각 24.79와 8.60으로 나타났다. 이는 누적곡선 을 이용한 Simulation모형의 예측력을 나타내는 것이며 특히 용량외해현상을 적용한 결과 MAPE 10%미만의 우수한 예측력을 나타냄을 볼 수 있다. 합류부 용량외해현상의 관계식을 보다 정교하 게 도출하고 분류부에도 이를 적용한다면 모형의 예측력은 더욱 향상될 것으로 보인다.

V 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 누적곡선법을 이용한 시뮬레이션 기법을 통해 도시고속도로의 혼잡상황을 나타 내는 교통량, 통행시간, 밀도 등의 시간적 변화를 나타낼 수 있는 방안을 제시하고 실용적 알고리 즘을 개발하여 그 유용성을 검증하였다. 지능형 교통체계(ITS)운영에 필요한 통행시간 예측과 실 시간 경로안내 등도 이러한 시뮬레이션 모형을 통한 장래 통행시간 자료가 필요하며, 도시고속도 로의 정체현상 감지와 미터링 등으로 변화될 교통의 흐름의 예측도 가능하다. 따라서 실용적인 교 통류 시뮬레이션 모형의 개발이 지속적으로 요구되고 있다.

본 연구에 있어 보완이 필요하며 앞으로의 연구과제는 다음과 같다.

첫째, 연속류의 특성상 최단경로 탐색을 초기에 하여 고정시켰지만 도시부 Network등 복잡한 가로망으로 확장적용을 위해선 장래 교통상황의 변화를 고려한 시간축 최단경로를 도출하는 방안 이 필요하다. 둘째, 시간변화 통행수요모형이 결합되어 전체적 동적 통행배분과정이 수립된 최적 값을 도출할 수 있어야 한다. 셋째, 누적곡선법에선 감지하기 힘든 차량간격의 변화 등 미시적 모 형의 결합방안이 필요하다. 끝으로 기억용량과 수행시간의 한계성을 들 수 있다. 방대한 도로망의 수십만대의 차량을 Simulation하기 위해선 개별차량을 한 대씩 진행시키기엔 무리가 있을 수 있으 며 새로운 알고리즘과 기억용량의 관리방안이 마련되어야 할 것이다.