

■ 論 文 ■

예측적 다중계층 동적배분모형의 구축 및 알고리즘 개발

The Development of Predictive Multiclass Dynamic Traffic Assignment Model and Algorithm

강진구
(백산엔지니어링 이사)

박진희
(건국대학교 지리학과 강의교수)

이영인
(서울대학교 환경대학원 교통관리전공 교수)

원제무
(한양대학교 도시대학원 교수)

류시균
(경기개발연구원 책임연구원)

목 차

- I. 서론
 - II. 기존연구의 고찰
 - III. 예측적 다중계층 이용자 균형 통행배분 모형 구축
 - 1. 용어 정리
 - 2. 동적 네트워크 모형
 - 3. 동적 네트워크 부하(dynamic network loading)
 - 4. 통행배분 모형의 정식화
 - IV. 알고리즘 개발
 - 1. 시간중속적인 최단경로 알고리즘
 - 2. 수정 MSA(Modified Method of successive average)
 - V. 사례연구
 - 1. 분석결과
 - VI. 결론 및 향후연구 과제
- 참고문헌

Key Words : 예측적 통행비용, 다중계층 통행배분모형, 수직적 대기행렬, 동적 네트워크부하, MSA

요 약

시간에 따라 변화하는 네트워크 상황을 반영하는 통행배분 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구의 배경에는 통행배분 모델이 도로망 계획이라고 하는 하드웨어 분야의 계획에만 그치지 않고 교통관리나 제어라고 하는 소프트웨어 분야의 계획에도 활용하고자 하는 사회적 필요성의 증가 때문이다. 또한, 통행배분 모형의 이론과 현실 사이의 괴리를 줄이고자 하는 차원에서 연구되고 있는 모형으로 다중계층 통행배분 모형이 있다. 이 모형은 다중 운전자 계층과 다차중 계층으로 구분되며 이중에서 동적모형과 결합될 수 있는 보다 현실성 있는 분야는 다차중 분야이다.

이러한 배경에서 본 연구의 목적은 이 두 분야를 결합한 다차중 동적 통행배분 모형을 구축하고자 한다. 이것은 동적 이용자 균형 배분 모형이 현재 이슈화 되고 있는 첨단교통체계(ITS)의 이론적 지주가 되고 있으며 따라서 이러한 동적모형을 다중계층 모형과 결합시킴으로써 보다 현실성 있는 동적 모형이 구축될 수 있을 것으로 기대되기 때문이다.

그렇지만 다수의 차종을 고려하게 되는 경우 기존의 동적 배분 모형의 구축을 위하여 필요한 FIFO가 위반된다. 이것은 FIFO 제약 조건하에 구축되는 기존의 동적 배분 모델링 방법으로는 다차중 동적모형의 구축이 불가능함을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 FIFO 제약조건을 완화 시킬 수 있는 동적 네트워크의 모형을 구축하였으며 동시에 기존의 네트워크 부하 기법의 하나인 시뮬레이션 기법을 수정하여 본 연구의 모형에 적용될 수 있도록 고안하였다. 또한 해법(알고리즘) 분야로 기존의 최단경로 산정 알고리즘을 수정한 시간중속적인 최단경로 알고리즘과, 기존의 MSA를 수정한 알고리즘도 구축하였다. 이렇게 구축된 모형과 알고리즘을 격자형 네트워크에 적용하여 동적이용자 균형을 산정하여 구축된 알고리즘의 수렴성을 검증하였다.

I. 서론

시간에 따라 변화하는 네트워크 상황을 반영하는 통행배분 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. 이러한 동적 모형의 연구의 배경에는 통행배분 모델이 도로망 계획이라고 하는 하드웨어 분야의 계획에만 그치지 않고 교통관리나 제어라고 하는 소프트웨어 분야의 계획에도 활용하고자 하는 사회적 필요성이 증가하고 있기 때문이다. 특히 최근 컴퓨터, 정보통신, 차량검지기 등 발달과 함께, 도로의 지능화가 진행되어, 도로와 차량 간의 통신을 이용한 경로유도 시스템을 이용하여 소요 시간이나 혼잡상황을 실시간으로 제공하고자 하는 연구가 소위 ITS(intelligent transportation system)라는 이름으로 진행되고 있는데, 이러한 새로운 기술의 이론적인 지주가 되는 것이 동적 통행배분 모형이다.

동적통행배분 모형이 정적모형의 예측치와 현실치와의 차이를 극복하고자 하는 차원에서 시작된 것과 마찬가지로 원래의 정적 통행배분 모형에서도 모형치와 현실치 차이를 극복하고자 하는 차원에서 태동된 것이 다중계층(multi class) 혹은 비대칭(asymmetric) 통행배분 모형¹⁾이다. 동적배분의 연구는 1970년대 초반 Yager(1971)와 Hurdle(1974)에 의하여 시작되었으며 최근 10년동안 집중적인 연구가 진행되고 있다. 그렇지만 동적모형 분야에서 다중계층 모형의 연구가 일천한 것은 이 분야에 대한 이론적인 연구가 아직까지는 확립되어 있지 못하기 때문이다. 따라서 기존의 동적배분 모형에 이러한 다중계층 모형을 결합함으로써 보다 현실성 있는 통행배분 모형이 구축될 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문에서는 예측적 다중계층 동적통행배분 문제를 해결하기 위하여 제2장에서는 기존연구를 제3장에서는 다중계층 동적모형의 정식화와 네트워크의 모형화를 제시하고, 제4장에서는 Dijkstra(1959) 알고리즘을 기반으로하는 시간축속적 알고리즘과 다중계층 동적 균형해를 산정할 수 있는 수정된 MSA(method of successive average)을 제시한다. 제5장에서는 제안된 방법의 효율성을 검증하기 위하여 사례연구를 실시하는 것으로 이 논문을 구성한다.

II. 기존연구의 고찰

동적모형은 시간에 따른 교통량의 변동을 표현한다는 측면에서 정적모형과 대비된다. 시간의 변동을 고려한다는 점에서 보다 현실적인 상황을 표현하는데 장점을 갖게 된다. 따라서 동적 통행배분 모형은 정적모형의 주요 측면에 가정이 완화된 모형으로 평가할 수 있다.

동적모형의 정식화 기법은 Simulation 기법을 이용한 모형화와 분석적(analytical) 기법을 이용한 모형화의 2가지 방법이 존재한다. Simulation 접근방법은 개별 운전자의 행태를 강조할 수 있는 기법으로 교통제어 시스템을 고려할 때 개별 운전자의 행태를 좀더 현실에 가깝게 근사시킬 수 있는 장점이 있으나 차량을 기반으로 모형의 구성하여야 하기 때문에 고려하여야 할 변수들이 과도하게 많아지고 출몰된 해의 일관성이 보장되지 못하는 문제가 있다. 반면 분석적 기법은 평균적인 운전자의 행태를 기반으로 모형을 구성하기 때문에 분석의 수준은 매크로(macroscopic) 하지만, 기설정된 운전자의 행태, 즉 효율 최대화나 균형조건 등에 따라서 최적 조건 등을 쉽게 모형화 할 수 있고 다양한 시나리오에 따른 민감도 분석 등이 Simulation 기법에 비하여 우수한 장점이 있다.

여기서 분석적인 기법은 다시 (1)수학적 접근법(mathematical programming approach) (2)최적 제어이론(optimal control approach) (3)변동부등식(variational inequality approach) 접근법으로 세분된다. 이상의 3가지 기법 중에서 수학적 모형은 계산 측면에서는 효율성이 높지만 다양한 실제 현상을 표현하는 것은 어렵고, 최적 제어이론 또한 다양한 실제 현상을 표현함에 수학적 모형과 같은 결점을 가지고 있다. 그렇지만 VI는 실제적 상황을 표현하는데 전문한 기법과는 달리 제약성이 적기 때문에 매우 유용한 기법으로 평가받고 있고 특히 최적제어이론으로 정식화될 수 없는 동적배분 문제에 특히 유용한 것으로 알려져 있다.(Smith, 1999; Ran and Boyce, 1994). 본 연구에서는 동적 모형의 구축함에 있어 유연한 장점을 가지고 있는 V.I.를 이용하기로 한다.

1) 대부분의 통행배분 모형은 교통량을 변수로 하여 모형을 구성하게 되는데 이 때 단변수로 구성하여 모형을 구성하는 경우를 단일계층(single class) 모형이라 하며 다변수로 구성할 경우를 다중계층(multiclass) 혹은 비대칭(asymmetric) 모형이라 한다. 단일계층 모형의 경우는 운전자를 동일한 특성을 지닌 그룹으로 가정하는 것으로 가령 교통정보를 제공하는 경우를 모형화 할 때 교통정보에 운전자별로 서로 상이한 반응을 보일 경우를 모형화하는 경우는 단일계층으로 모형화되지 못한다. 마찬가지로 차량별로 서로 상이한 차량 특성이 존재하여 이를 모형화 할 경우에도 단일계층으로는 모형화하기 불가능하다.

한편, 동적 모형의 제약조건인 네트워크의 모형은 시간에 따라 변화하는 교통류 행태를 보다 정밀하게 구성할 필요가 있다. 최근에 많은 연구들이 도시부 도로와 같이 대기행렬이 존재하는 혼잡한 네트워크에 초점을 맞추어 모델링하고 있다. 네트워크상의 혼잡을 표현하는 방법으로 속도-밀도간의 관계를 설명하는 fundamental diagram을 이용하여 지체를 설명하는 방법과 교통 신호에 의하여 발생하는 지체를 설명하는 방법, 대기차량에 의하여 발생된 것을 지체로 하는 방법(Bell, 1995) 등 크게 3가지 유형이 제안되고 있다. 이러한 방법 중에서 링크의 통행시간을 상수적 주행시간(constant running time)²⁾과 대기행렬 지체(queuing delay)로 구성되는 점대기 행렬 모형(Kuwahara와 Akamatsu, 1997)이 최근 관심을 받고 있다. 대기행렬의 특성을 적용하는 방법에 따라 크게 2가지로 구분되는데 이는 수직적 대기행렬(vertical queue 혹은 point queue)과 수평적 대기행렬(horizontal queue)이다. 현재까지 개발된 대부분의 모형에서는 수직적 대기행렬을 사용하고 있으며, 이는 전통적인 대기행렬 이론에 따른 것으로 동적 네트워크를 모델링 하는데 제약조건을 쉽게 만족시킬 수 있는 장점이 있는 반면 앞막힘 현상(spill-back)등 네트워크의 교통 현상을 표현하는데 한계가 있는 것이 사실이기 때문에 최근 수평적 대기행렬 모형의 연구가 시도되고 있다(Astarita, 1996; Adamo 등, 1999). 그러나 통행배분의 문제에 있어서는 도착지까지의 통행시간이 중요한 변수이기 때문에 대부분의 동적 모형에서는 점대기행렬 모형에 입각하여 연구가 주류를 형성하고 있다. 본 연구에서도 점대기행렬에 입각하여 네트워크를 모델링한다.

그렇지만 상수적 주행시간의 가정은 링크상의 교통량의 크기에 관계없이 항상 일정한 (자유)통행시간이 소요되기 때문에 현실 네트워크와는 큰 차이가 나타난다. 기존의 연구에서 상수적 주행시간을 도입한 이유는 유입교통류(inflow rate)와 유출교통류(outflow rate) 및 통행함수가 상호 일관성 있게 FIFO를 만족시키면서 상태방정식 및 교통류 전파식의 구성이 가능하도록 만들고자 함에 있다. 따라서 FIFO의 조건이 현실의 교통 현상과는 괴리가 있지만 동적 네트워크 모형을 구축하는데 매우 긴요한 제약 조건 될 수밖에 없다. 그러나 상수적 주행시간의 가정은 현실과는 너무 동 떨어진 조건으로 이

를 완화시킬 수 있는 연구가 필요하다. 이러한 조건의 완화에서 가장 문제가 되는 것은 FIFO 원리의 위반이 나타난다는 점이다. 전술한 바와 같이 FIFO가 만족되지 않으면 교통류 전파조건과 통행비용 함수와의 관계 속에서 링크 상에 나타나는 대기행렬의 표현이 불가능해진다. 따라서 전통적인 방법으로는 네트워크의 모델링이 불가능해짐에 따라 이에 대한 해결책을 제시한다. 이것은 동적통행배분 문제에 현실적인 통행비용 함수의 적용이 가능하게 되어 보다 다양한 동적배분 모형의 연구가 가능하게 될 것으로 기대된다.

FIFO가 완화된 상태에서의 링크통행비용의 산정은 FIFO의 조건하의 통행비용 산정과는 다소 차이가 발생한다. 즉, 추월 차량이 통행시간에 영향을 주었는지의 여부이다. 추월을 당한 차량의 경우 추월한 차량이 통행시간에 영향을 주었는지의 여부는 명확하게 판단하기 어렵고 아직까지는 이에 대한 구체적인 연구도 시도된 바 없다. 본 연구에서는 차량이 주행하는 동안은 추월 차량에 의한 통행시간의 영향은 없는 것으로 가정한다. 단, 대기행렬구간에서 이 추월 차량과 합류하게 되는 경우는 당연히 영향을 받기 때문에 대기행렬에서는 영향을 받는 것으로 한다. 이는 운전자의 경로 선택에 있어 과거 시간대의 교통량만이 영향을 주어야 한다는 동적배분의 주요한 원리 중의 하나인 인과성의 원리(causality principle)(Heydecker and Addison, 1996a)를 반영하기 위한 것이다. 따라서 지체가 발생하지 않는다 하더라도 추월한 차량이 합류한 구간의 밀도가 앞 구간보다 크게 되면 추월 차량에 의한 영향이 발생할 수 있다. 이러한 문제는 분석 단위시간을 가능한 짧게 설정함으로써 완화될 수 있을 것으로 판단된다. 이에 대한 자세한 연구는 향후 연구로 하고 본 연구에서 링크 하류부 도달시간은 차량이 링크에 진입하는 시점에 링크상에 존재하는 교통량을 변수로 하여 산정한다. 단, 대기행렬의 차량은 지체시간 산정시에 반영되기 때문에 중복됨을 고려하여 링크상의 교통량 중에서 대기행렬의 차량은 제외한 링크상의 주행 차량으로 한정한다.

한편, 동적 통행배분 모형에서는 2가지의 통행비용 개념, 즉, 순간적(instantaneous 혹은 reactive)와 예측적 혹은 이상적(predictive 혹은 ideal) 통행비용이 존재한다. 순간적 경로선택 모형은 진입하는 순간의 주어진 네트워크 조건이 변하지 않는다는 전제하에 자신의 최

2) 통상 자유통행시간을 적용한다.

적 경로를 선택하는 것을 가정한다. 교통상황을 알 수 없는 운전자가 교통방송이나 가변정보(VMS)을 이용하여 경로를 선택하고 있는 현실의 교통 행태는 순간적 경로 통행비용의 개념에 입각한 경로 선택이라 할 수 있다.

이것에 비하여 예측적 경로 통행비용은 통행자가 네트워크를 통행하는 동안 자신이 경험한 통행비용을 의미한다. 다시 말하면, 경로통행비용을 계산할 때 링크에 진입한 후 변화하는 네트워크의 상황을 계속적으로 반영하면서 링크의 통행비용을 계산한다. 따라서 이어지는 링크의 비용은 해당 링크의 진입시의 통행비용을 기초로 계산되게 된다³⁾. 따라서 통행자의 완전 정보의 가정하에 성립되는 이용자 균형의 개념에서 보면 순간적 통행비용의 개념보다는 보다는 예측적 통행비용의 개념이 더 적합해 진다. 본 연구에서는 예측적 통행비용을 적용한다.

III. 예측적 다중계층 이용자 균형 통행배분 모형 구축

1. 용어 정리

- $e_a^{M_i}(t)$: 시간 t 에 링크 a 의 차종 M_i 의 유입 교통량 (inflow), $e_a(t) = \sum_{M_i \in M} e_a^{M_i}(t)$
- $E_a^{M_i}(t)$: 시간 t 까지의 링크 a 의 차종 M_i 의 누적 유입교통량, $E_a(t) = \sum_{M_i \in M} E_a^{M_i}(t)$
- $x_a^{M_i}(t)$: 시간 t 에 링크 a 에 존재하는 차종 M_i 의 교통량, $x_a(t) = \sum_{M_i \in M} x_a^{M_i}(t)$
- $v_a^{M_i}(t)$: 시간 t 에 링크 a 상의 차종 M_i 교통량 중에서 대기행렬차량을 제외한 교통량, $v_a(t) = \sum_{M_i \in M} v_a^{M_i}(t)$
- $g_a^{M_i}(t)$: 시간 t 에 링크 a 의 차종 M_i 의 하류부 (node) 유입 교통량, $g_a(t) = \sum_{M_i \in M} g_a^{M_i}(t)$
- $h_a^{M_i}(t)$: 시간 t 에 링크 a 의 차종 M_i 의 하류부의 유출 교통량, $h_a(t) = \sum_{M_i \in M} h_a^{M_i}(t)$
- $H_a^{M_i}(t)$: 시간 t 까지의 링크 a 의 차종 M_i 의 누적 유

출교통량, $H_a(t) = \sum_{M_i \in M} H_a^{M_i}(t)$

$L_a^{M_i}(t)$: 시간 t 에 링크 a 의 하류부 차종 M_i 의 대기

행렬 차량, $L_a(t) = \sum_{M_i \in M} L_a^{M_i}(t)$

$\tau_{aM_i}(t)$: 시간 t 에 링크 a 에 진입한 차종 M_i 의 하류부까지의 도착시간

$d_a[t + \tau_{aM_i}(t)]$: 시간 t 에 링크 a 에 진입한 차종 M_i 가 노드에서의 지체시간(delay time)

$c_{aM_i}(t)$: 시간 t 에 링크 a 에 진입한 차종 M_i 의 링크 통행시간

$TT_{a, M_i}(t)$: 시간 t 에 링크 a 에 진입한 차종 M_i 가 기점에서 링크 a 를 통과할 때까지의 통행시간

C_a^s : 링크 a 의 구간 용량(segment capacity)

C_a^n : 링크 a 의 노드 용량(point or node capacity)

r, s, M_i, M : 기점, 종점, 차종, 유한 차종집합

2. 동적 네트워크 모형

1) 교통량 보존식(flow conservation equation)

시간 t 에 $r \rightarrow s$ 간을 연결하는 차종 M_i 의 경로의 집합을 $P_{M_i}^{rs}(t)$, $r \rightarrow s$ 간의 차종 M_i 의 임의의 경로 p 상의 수요는 $f_{M_i, p}^{rs}(t)$ 로 하고, 시간 종속적인 O-D는 알려진 것으로 가정하고, $f^{rs}(t) = \sum_{M_i \in M} f_{M_i}^{rs}(t)$ 로 정의하면 식(1)과 같은 형태로 교통량 보존식을 표현할 수 있다.

$$f_{M_i}^{rs}(t) = \sum_{p \in P_{M_i}^{rs}(t)} f_{M_i, p}^{rs}(t) \quad \forall r, s, M_i, t \quad (1)$$

마찬가지 방법으로 식(1)을 링크에 대하여도 정의할 수 있다. 링크상의 교통량 보존식은 소위 상태방정식으로 표현되는데, 상태방정식은 누적 교통량 형식 혹은 미분형식으로 표현 된다. 만약, 누적교통량 형식으로 표현하면 식(2)와 같다. 여기서 초기 네트워크 상의 교통량은 없는 것으로 가정한다.

$$x_a^{M_i}(t) = E_a^{M_i}(t) - H_a^{M_i}(t) \quad \forall a, t, M_i^A \quad (2)$$

3) Ran과 Boyce(1996)는 경로 통행비용의 개념을 'ideal'과 'instantaneous'로 구분하였고 Buisson등(1998)¹⁾, Kuwahara와 Akamatsu(1997)¹⁾는 이러한 'ideal'과 'instantaneous'를 각각 'predictive', 'reactive'로 표현하였다.

4) $x_a(t) = \sum_{M_i \in M} x_a^{M_i}(t)$ 로 정의하면 $x_a^M(t) = \sum_{r,s} \sum_{M_i \in M} f_{M_i, p}^{rs}(k) \delta_{M_i, p}^a(k)$ 로 표현된다.

$$\delta_{M_i, p}^a(k) = \begin{cases} 1 & \text{시간 } k \text{에 경로 } p \text{를 출발한 차종 } M_i \text{의 교통류가} \\ & \text{시간 } k \text{에 링크 } a \text{ 상에 있으면} \\ 0 & \text{그렇지 않으면} \end{cases}$$

한편, 식(2)의 $x_a(t)$ 는 링크 전 구간의 교통량으로 이를 링크시점에서 하류부까지의 교통량과 물리적으로는 하나의 점으로 나타나는 노드상의 대기행렬 교통량으로 구분하여 표현하여 표현 할 수 있다.

$$x_a^{M_i}(t) = e_a^{M_i}(t) + v_a^{M_i}(t) + L_a^{M_i}(t) \quad (3)$$

정적배분과 마찬가지로 동적배분에서 적용되는 모든 변수는 비음이다.

2) 교통류 전파 및 링크 유출함수⁵⁾

교통류 전파란 링크상에서 차량의 진입, 진출 및 차량 등의 링크 통행시간과의 상호 관련성을 표현한 식이다. Astarita(1996)는 FIFO를 보증하면서 교통류 전파를 표현하는 유출함수로 아래의 식(4)를 제시하였다.

$$h_a^{M_i}(t + c_a(t)) = \frac{e_a^{M_i}(t)}{\frac{dc_a^{M_i}(t)}{dt} + 1} \quad (4)$$

여기서 FIFO가 만족되는 조건은 다음과 같다 (Friesz 등(1993)).

$$\frac{dc_a^{M_i}(t)}{dt} \geq -1 \quad (5)$$

Han(2002)은 다음과 같은 형식으로 이를 정의하였다.

$$h_a(c_a^{M_i}(t)) = \frac{e_a^{M_i}(t)}{\frac{dc_a^{M_i}(t)}{dt}} \quad (6)$$

이 식에서는 진입시점을 표기하지 않았기 때문에 식(4)와 수식의 모양이 다르나 링크의 진입 시간을 t 로 하면 동일한 수식이 된다. 이러한 식(4)와 같은 유형의 수식에 적용 가능한 통행비용 함수로 $c_a(t) = a + bx(t)$ 와 같은 선형식을 제안하였다(여기서 a 는 자유통행시간). 그렇지만 식(4)는 선형통행비용 함수와 분석 단위시간 2.5초 이하로 할 경우에만 유입교통량과 유출교통량이 근사적으로 같아지게 된다(Astarita, p91 참조). 엄밀히 말하면 식(4)와 같은 유출함수는 선형 통행함수를 적용한다 하더라도 근사적으로만 FIFO가 만족될 뿐이다.

그러나 링크의 통행비용 함수는 일반적으로 알려진 바와 같이 선형함수도 아니고 뿐만 아니라 차량이 링크 하류부(노드)에 도달할 때까지 자유통행시간(혹은 상수적 순행시간)으로 이동하지도 않는다. 자유통행시간으로 이동한다고 가정하더라도 차종을 고려하게 되면 차종별로 서로 다른 자유통행시간이 존재하기 때문에 추월의 문제는 여전히 발생한다. 따라서 다수의 차종을 고려하는 경우 식(4)와 같은 링크 유출함수를 사용할 수 없다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 1)항의 교통량 보존에서와 마찬가지로 링크를 물리적인 길이를 갖는 링크구간과 링크의 한 부분이지만 점의 형태로 나타나는 링크의 하류부인 노드로 구분하여 유출함수를 정의한다. 시간 t 에 링크에 진입한 차량 M_i (실제로는 일단의 교통량 혹은 Packet)의 링크 하류부까지의 통행시간 $\tau_{aM_i}(t)$ 의 통행시간이 경과한 $t + \tau_{aM_i}(t)$ 에 링크 하류부에 도착할 때 링크 하류부에서의 유출함수 $g_a[t + \tau_{aM_i}(t)]$ 는 식(7a)와 같이 표현된다. 이때 $t + \tau_{aM_i}(t)$ 을 노드의 진입 시간으로 하면 노드에서의 유출함수 $h_a[t + \tau_{aM_i}(t)]$ 는 식(7b)와 같이 표현된다.⁶⁾

링크 :

$$g_a[t + \tau_{aM_i}(t)] = \begin{cases} e_a(t) & \text{if, 추월이 없을 때} \\ e_a(t) + e_a(a) + e_a(w) & \text{if, 추월이 존재할 때} \end{cases} \quad (7a)$$

노드 :

$$h_a[t + \tau_{aM_i}(t)] = \begin{cases} g_a[t + \tau_{aM_i}(t)] & \text{if, } L_a[t + \tau_{aM_i}(t)] = 0, \\ [e_a(t) + e_a(a) + e_a(w)] < C_a^n & \\ C_a^n \text{ 그 외} & \end{cases} \quad (7b)$$

여기서

- $e_a(a)$: t 이전에 링크 a 에 진입하였으나 $e_a(t)$ 와 링크하류부에 동일한 시간구간에 도착된 차량수
- $e_a(w)$: 시간 t 이후에 링크 a 에 진입하였으나 $e_a(t)$ 와 링크하류부에 동일한 시간구간에 도착된 차량수

5) 수식의 표기는 본 논문의 표기체계를 적용하기 위하여 원 논문의 표기체계를 수정하여 표기하였음

6) 여기서 $g_a[\cdot] = \sum_{M_i} g_a^{M_i}(\cdot)$, $h_a(\cdot) = \sum_{M_i} h_a^{M_i}(\cdot)$, $L_a(\cdot) = \sum_{M_i} L_a^{M_i}(\cdot)$ 즉, 모든 차종의 합으로 정의한다.

$L_a[t + \tau_{aM_i}(t)]$: 시간 t 에 링크 a 에 진입한 차종 M_i 가 $t + \tau_{aM_i}(t)$ 에 만난 대기차량

식(7b)는 점 대기행렬 모형을 기반으로 유출함수를 표현한 식으로, t 에 링크에 진입한 차량 $e_a(t)$ 와 동시에 링크하류부에 도착한 차량이 링크의 용량보다 작고 대기차량(L_a)이 없는 경우 링크의 유출차량은 링크하류부에 도착한 차량이 된다. 그렇지 않으면 노드의 용량 C_a^n 만큼만 유출하게 되는 것을 표현한 식이다.

이 유출 함수는 FIFO가 만족되는 구조를 갖게 된다. 이는 다음과 같은 수식으로 간단히 증명할 수 있다. 시간 t 에 진입한 차량의 링크 하류부 도달시간인 $t + \tau_{aM_i}(t)$ 를 t' 로 놓고, t' 에 진입한 차량의 통행시간(대기행렬에 의한 지체 시간)을 $d_a(t')$ 라 놓으면 Friesz 등이 입증한 FIFO 조건을 만족하게 된다. 즉

$$t' + d_a(t') < t + \Delta t + d_a(t + \Delta t)$$

양변을 Δt 로 나누고 정리하면

$$1 + \frac{(d_a(t + \Delta t) - d_a(t'))}{\Delta t} > 0$$

$\Delta t \rightarrow 0$ 으로 하면

$$\frac{d}{dt} d_a(t) = \frac{d}{dt} d_a[t + \tau_{aM_i}(t)] > -1$$

3) 동적 링크통행시간

전술한 바와 같이 예측적(predictive)(이상적(ideal), 혹은 실제적(actual)) 통행시간을 적용한다. 단, 네트워크의 모델링을 링크구간과 노드구간으로 구분하였으므로 링크의 통행시간도 링크에 진입하는 시점과 노드에 진입하는 시점으로 구분하여 산정하여 합산하기로 한다.

즉, 각 차종의 링크 통행비용 함수는 링크에 진입하여 링크 하류부 도달시점 까지는 진입시점의 각 차종별 교통량을 결정변수(decision variable), 노드의 경우는 노드에 진입하는 순간의 유입교통류와 대기행렬 차량을 결정변수로 하는 함수를 통행비용 함수로 구축한다. 즉, 링크의 통행시간은 링크 하류부까지의 주행시간과 노드에서의 지체시간의 합으로 구성된다. 여기서 하류부까지의 통행시간은 Lawphongpanich와 Hearn(1984), Mahmassani와 Mouskos(1988) 등이 비대칭(혹은다중계층) 통행배분 모형에서 적용한 BPR 함수를 이용하여 산정한다.

BPR함수에 적용되는 변수는 통상 링크상의 교통량이 결정변수(decision variable)가 되므로 본 연구에서는 링크 하류부까지 존재하는 교통량을 변수로 하여 산정한다. 따라서 링크 진입 시점에 하류부까지의 링크상에 존재하는 교통량을 적용하여 하류부까지의 통행시간을 산정한다. 단, 임의의 시간 t 에 진입한 차량의 링크 하류부까지의 통행시간 산정시 시간 t 이후에 진입한 차량중 시간 t 에 진입한 차량을 추월한 차량이 존재하는데 본 연구에서는 이러한 추월 차량에 의한 링크통행시간 산정에 영향을 주지 않으므로 가정한다. 또한 대기행렬 차량에 의한 지체시간은 링크 하류부 진입시간에 형성된 대기차량을 변수로 하여 산정한다. 따라서 BPR함수에 적용하는 결정변수는 $v_a(t)$ 가 된다. $v_a(t)$ 는 식(3) 및 식(9)를 이용하여 구한다.

$$\tau_{aM_i}(t) = t_{aM_i}^0 [1 + \alpha_{aM_i} (\sum_{M_j \in M} \frac{\eta_{M_j} \cdot v_{aM_j}(t)}{C_a^s})^{\beta_{aM_i}}] \tag{8}$$

여기서

$t_{aM_i}^0$: 차종 M_i 의 링크 a 의 자유 통행시간

$\alpha_{aM_i}, \beta_{aM_i}$: 링크 a 의 차종 M_i 의 특성 파라메타

η_{M_i} : 차종 M_i 의 특성 파라메타

$$L_a(t) = g_a(t) - h_a(t) \tag{9}$$

식(9)의 $g_a(t), h_a(t)$ 는 식(7a, 7b)와 동일한 방법으로 산정된다. 한편, 대기행렬에 의한 지체시간은 식(10)을 이용하여 산정한다.

$$d_a[t + \tau_{aM_i}(t)] = \frac{L_a[t + \tau_{aM_i}(t)]}{C_a^n} \tag{10}$$

따라서 시간 t 에 링크 a 에 진입한 차량 M_i 의 링크 통행함수는 식(11)과 같고 해당 링크까지의 총통행시간은 식(12)와 같게 된다.

$$c_{aM_i}(t) = \tau_{aM_i}(t) + d_a[t + \tau_{aM_i}(t)] \tag{11}$$

$$TT_{aM_i}(t) = t + c_{aM_i}(t) \tag{12}$$

한편, 식(8) 및 식(10)에 적용된 용량은 서로 개념이

상이다. 용량이란 도로의 한 지점 혹은 일정 구간을 통과하는 최대차량대수로 정의된다. 전자를 지점용량(point capacity), 후자를 구간용량(segment capacity)이라 정의 할 수 있다. 식(8)에 적용되는 용량은 구간용량이 적용된다. 구간용량의 산정은 교통량-속도-밀도 관계식 $D = \frac{F}{V}$ (D =밀도(veh/km), F =flow rate(veh/h), V =속도(km/h))를 이용하여 산정할 수 있다. 따라서 F 에 용량을 적용하고 V 에 자유통행속도를 적용하면 용량밀도 D 를 얻을 수 있다. 또한 식(10)의 지점용량은 노드에서의 용량이고 대기행렬에서의 용량이므로 포화용량(saturation flow rate)을 적용한다. 가령, 용량이 2000(대/h)이고, 속도가 80(km/h)라면 밀도는 25(대/km)가 된다. 만약 링크의 길이가 2km라면 구간용량 50대를 산정할 수 있다. 또한 포화교통류율 차두간격(saturation flow rate headway)을 2(초/대)라 하고 1분의 지점용량을 계산하면 30대를 얻을 수 있다. 이러한 계산 과정을 통하여 각 링크의 구간용량 및 지점용량을 산정한다.

3. 동적 네트워크 부하(dynamic network loading)

동적 네트워크 부하(DNL) 과정이란 모든 기종점 쌍에 대하여 통행배분 알고리즘에 의하여 매 반복과정에서 산정된 경로 교통류를 가지고 네트워크 상에 어떻게 배분할 것인가를 결정하는 과정이다. 시간의 변수가 존재하지 않는 정적배분에서는 모든 경로 상에 유입교통류 및 해당경로의 링크상의 유입교통류가 항상 일정한 값을 갖게 되어 매우 단순하지만, 동적배분에서는 교통량 전파 현상이 나타나기 때문에 이와는 매우 다른 과정을 겪는다. 즉, 매시간 다수의 기종점간의 다양한 경로로부터 나온 교통류가 언제 얼마만큼의 교통류가 노드에 도착하고 이어지는 다음 링크에 어떻게 분배할 것인가를 결정하여야 한다.

이러한 동적 부하 방법은 크게 3가지 부류로 구분된다. 첫째는 확장된 시-공간 네트워크(Expanded time-space network)기법. 이 기법은 주로 Ran and Boyce(1996), Chen and Hsueh(1998)에 의하여 연구되었다. 둘째는 최적화 기법으로 Wu, Chen and Florian, 1998)에 의하여 주로 연구되었다. 세 번째는 흐름도 혹은 시뮬레이션이라고 표현되는 기법으

로 Xu, Wu, Florian, Marcotte, and Zue(1999), Han(2000), 임강원(2002)등에 의하여 연구되었다. 본 연구의 동적 네트워크 배정은 최근 임 강원(2002), 한 상진(2002)에 의하여 연구된 시뮬레이션 기법을 적용한다. 이들 연구에서 구축한 DNL 과정은 서로 유사하다. 다만 기존 연구에서의 DNL은 추월이 반영되지 않은 형식으로 되어있으므로 본 연구와 같이 링크 구간에서 추월이 존재하는 모형에 적용될 수 있도록 수정된 DNL를 제시한다. 이를 정리하면 다음과 같다.

[step 1] Initialization

- ① 시간대(time interval) $t = 1$
- ② $e_a(t), g_a(t), h_a(t), C_a^s, C_a^n, f_{M_i, p}^s(t)$ 을 설정

[step 2] Link inflow calculation

$f_{M_i, p}^s(k) \delta_{M_i, p}^a(t)$ 을 이용하여 $e_a(t)$ 를 산정

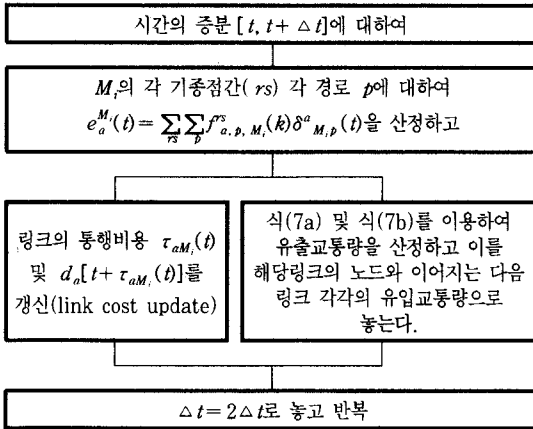
[step 3] Link segment exit flow & node inflow calculation

- ① 식(2) 및 식(3)을 이용하여 Link segment상의 교통량 $v_a(t)$ 을 산정
- ② 식(8)을 이용하여 Link segment 통행시간 $\tau_{aM_i}(t)$ 를 계산
- ③ 식(7)을 이용하여 $g_a[t + \tau_{aM_i}(t)]$ 을 구하고 이를 node의 inflow로 놓는다

[step 4] Queue & next link inflow calculation

- ① 식(7b)를 이용하여 Queue 및 next link inflow를 산정하고 식(11) 및 식(12)를 이용하여 링크 통행시간 $c_{aM_i}(t)$ 및 $TT_{aM_i}(t)$ 를 산정한다.
- ② $t = T$ (분석최종시간)이면 정지, 그렇지 않으면 $t = t + 1$ 로 하여 step2로

이상의 과정을 그림으로 표현하면 <그림 1>과 같다. 이러한 링크상의 배정과정은 실제 교통류의 진행과정은 다소 상이한 교통류의 진행 과정을 나타낸다. 왜냐하면 현실 교통류의 진행은 노드의 시간 용량만큼만 유출되고(이 경우 연속적인 흐름일 수도 있고 일정 시간단위의 흐름일 수도 있다) 다음 링크에 유입되는 과



(그림 1) 동적 배정(dynamic loading) 및 링크비용 갱신 과정도

정으로 진행되나 본 연구의 링크상의 교통류의 흐름은 존간 경로간 차종별 교통량이 하나의 packet 단위로 움직이기 때문에 하나의 packet 단위의 교통량이 일정 시간이 경과한 후 일괄적으로 다음 링크에 유입되는 과정으로 진행되기 때문에 현실교통류와 움직임과 다소의 차이를 보인다고 말할 수 있다.

4. 통행배분 모형의 정식화

1) 예측적 다중계층 동적 이용자 균형의 정의

[정의] 만약 동일 시간 구간 동안 출발한 각 차종별 통행자가 경험한 경로의 통행시간은 차종별로 동일하고 최소이며 경험하지 않은 경로의 통행시간보다 작다. 혹은 "어떤 차종의 통행자도 임의적으로 자신의 경로의 변경을 통해서 통행 시간을 단축시킬 수 없다".

즉, 균형 상태에서 시간 구간 t 동안 차종 M_i 가 기점 r 을 떠나 경로 p 를 이용하여 종점 s 로 가는 교통량이 양이라면 즉, $f_{M_i,p}^{rs}(t) > 0$ 이면 경험하는 경로 통행시간은 최소이다. 그렇지만 $f_{M_i,p}^{rs}(t) = 0$ 이면 경로 통행시간은 최소통행시간보다 크거나 같다. 이러한 동적 이용자 최적 균형 상태를 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

$$f_{M_i,p}^{rs}(t) > 0 \Rightarrow \text{if, } c_{M_i,p}^{rs}(t) = c_{M_i,p}^{rs*}(t) \quad (13)$$

$$f_{M_i,p}^{rs}(t) = 0 \Rightarrow \text{if, } c_{M_i,p}^{rs}(t) \geq c_{M_i,p}^{rs*}(t) \quad (14)$$

여기서

$$c_{M_i,p}^{rs}(t) : \text{시간구간 } t \text{에 출발한 차량 } M_i \text{가 경험}$$

한 경로 p 의 통행시간

$$c_{M_i,p}^{rs*}(t) : \text{시간구간 } t \text{에 출발한 차량 } M_i \text{가 OD 쌍 } rs \text{ 간의 최단통행비용}$$

2) 정식화

이용자 균형에 대한 식(13) 및 식(14)의 DUO 조건은 V.I. 모형으로 정식화 된다. V.I.는 분리 혹은 비분리 문제(separable or non-separable problem) 모두에 적용할 수 있기 때문에 동적배분 문제에 특히 유용한 기법이다. 위 식(13) 및 식(14)에서 경로 교통류벡터 $f(\cdot)$ 가 네트워크 제약조건 식(1), (2), (3), (7a), (7b), (8), (9), (10), (11)을 만족하면(이것을 만족하는 공간을 $N(t)$ 라 하자) 다음의 변동부등식으로 정식화 할 수 있다.

$$-\sum_{M_i \in M} [u_{M_i} - f_{M_i}(t)] \cdot c_{M_i}(t) \leq 0 \quad (f^*(t) \text{는 이용자 균형해}) \quad (15)$$

여기서

$c_{M_i}(t) : \text{시간 } t \text{에 진입한 차종 } M_i \text{가 경로상에서 경험한 통행시간벡터}$

$f_{M_i}(t) : \text{시간 } t \text{에 진입한 차종 } M_i \text{의 경로 유입교통량(inflow) 벡터}$

$u_{M_i} : \text{시간 } t \text{에 배정될 수 있는 차종 } M_i \text{의 모든 가능 경로 교통량 벡터}$

식(15)는 $f(t) = u$ 일 때 0이 얻어지고 이 식의 가장 큰 값은 0이기 때문에 0을 만족하는 $f_{M_i}(t)$ 는 이용자 균형해가 된다(Heydecker and Verlander (1999)). 따라서 이용자 균형해 $f_{M_i}^*(t)$ 는 다음의 최소화 문제로 정식화 된다.

$$\min_{f_{M_i}(t) \in N(t)} \sum_{M_i \in M} G(f_{M_i}(t)) \quad (16)$$

$$G(f(t)) = \max_{u \in N(t)} -[u_{M_i} - f(t)] \cdot c(t) \quad (17)$$

식(17)은 식(15)의 조건에 따라 균형상태에서는 정확히 0이 된다. 식(17)을 모든 시간대로 확장하면 식(18)과 같다.

$$\min_f \int_t \sum_{M_i \in M} G(f_{M_i}(t), t) dt \quad (18)$$

s.t. $f(t) \in N(t)$

식(18)을 링크 기반으로 표현하면

$$\min_e \int_t \sum_a \sum_{M_i \in M} c_a^{M_i}(t) [\mu_a^{M_i} - e_a^{M_i}(t)] dt \quad (19)$$

s.t.

$$f_{M_i}(t) \in N(t)$$

$\mu_a^{M_i}$: 시간 t 에 배정될 수 있는 모든 가능 링크 교량 벡터

IV. 알고리즘 개발

본 절에서는 본 연구에서 구축한 시간중속적인 최단경로 산정 알고리즘을 먼저 살펴보고 동적 이용자 균형해를 산정하기 위하여 기존의 MSA(Method of successive average)을 수정한 알고리즘을 제시한다.

원래 MSA는 탐색크기(move size)가 기 결정된 휴리스틱한 알고리즘이다. 이 기법은 탐색 크기를 최적화 기법으로 결정하기 않기 때문에 탐색의 반복회수가 최적화 기법에 비하여 비효율적이지만 시간의 변동에 수요가 달라지는 동적배분 문제에서는 최적화 기법의 적용이 반드시 효율적이라고 할 수 없다. 특히 오늘날 컴퓨터 연산기능의 비약적인 발전이 이루어짐에 휴리스틱한 알고리즘의 적용이 늘어나는 추세에 있다.

1. 시간중속적인 최단경로 알고리즘

시간 중속적인 최단경로의 탐색은 기본적으로 Dijkstra(1959)을 준용한다. Dijkstra 알고리즘은 비음의 네트워크에서 가장 효율적인 알고리즘으로 알려져 있고 이 알고리즘은 최적원리 즉 최단경로의 부분경로도 또한 최단경로라는 성질에 기초하여 개발된 것이다.

본 연구에서는 이 알고리즘을 시간에 따라 링크의 통행비용이 변하고 동일 시간이라 하더라도 차종에 따라 다른 통행시간이 존재하는 동적 네트워크에서의 최단경로를 산정할 수 있도록 다음과 같은 방법으로 수정하였다.

시간 t 에 기점 r 을 떠나는 차종 M_i 에 대하여, 이 차종 M_i 가 노드 l 을 떠나는 시간을 $v_{lr}^{M_i}$ 이라 하고, 시

간 t 에 기점 r 로부터 차종 M_i 의 최단경로상의 부분 경로인 링크 $(I_{lr}^{M_i}, l)$ 의 자손노드(predecessor 혹은 backnode)을 $I_{lr}^{M_i}$ 라 하자. loose-end 표 L 은 최단경로 알고리즘에 기 도달된 노드를 포함한 것으로 정의하자. 단, 자손노드 전체를 완전히 탐색한 것은 아니다. 노드 r 로부터 모든 종점 s 로 가는 시간 중속적인 최단 경로는 다음과 같은 절차를 통하여 결정된다.

[step 1]

$v_{rr}^{M_i} = t$ 를 제외하고는 모두 $v_{lr}^{M_i} = \infty$ 로 놓는다. 그리고 $L = \emptyset$ 로 한다.

[step 2]

기점노드 r 을 "current node" l 로 하여 출발한다.

[step 3]

current node l 로부터 각 링크 $a = (l, m)$ 을 검사. 만약 시간 $v_{lr}^{M_i}$ 에 링크 a 상의 노드 l 에 진입하는 차종 $e_a(v_{lr}^{M_i})$ 중 차종 M_i 가 링크 a 를 떠날 때까지의 총 통행시간 $TT_a(e(v_{lr}^{M_i}))$ 가 $TT_a(e(v_{lr}^{M_i})) < v_{lm}^{M_i}$ 이면 $v_{lr}^{M_i} = TT_a(e(v_{lr}^{M_i}))$ 및 $I_{lr}^{M_i} = l$ 로 놓고, 만약 노드 m 이 종점이 아니면 m 을 L 에 포함시킨. $TT_a(\cdot)$, $e_a(\cdot)$ 은 각각 식(11), 식(12)의 통행시간 함수 및 3장 3의 네트워크 모딩을 통하여 산정한다.

[step4]

L 에서 l 을 제거. 만약, L 이 공집합이면 중지

[step5]

$v_{lr}^{M_i}$ 가 L 내의 모든 노드 가운데 최소이면 L 로부터 노드 L_k 를 선택하고 L_k 을 current node에 포함시키고 step3으로

2. 수정 MSA(Modified Method of successive average)

정적배정 문제에서는 다중계층 통행배정 문제를 풀기 위한 다양한 방법 등이 사용되어 오고 있다 (Patricksson, 1994; Meneguzzer, 1995) 이러한

방법 가운데 가장 간단한 기법이 MSA이다. 링크상의 교통량은 이전 반복 과정에서 배정된 교통량과 최단경로 배정 교통량과의 선형 결합에 의한 배정된다. 정적 배분에 있어 경로의 교통량은 시간에 독립적이기 때문에 경로상의 교통량을 평균화하는 과정과 링크 교통량을 평균화하는 과정이 동일하게 되지만 시간을 고려하는 동적배분에서는 교통류 전파에 따라 링크에서 체류하게 되는 시간이 달라지기 때문에 오차가 발생하게 된다. 이러한 문제로 해서 동적배분에서는 경로 교통량을 대상의 MSA를 수행하고 결정된 경로 교통량을 DNL을 이용하여 링크상에 배정하여야 이러한 오차를 제거할 수 있다. 수정된 MSA의 절차를 간략히 설명하면 다음과 같다.

$f_{M_i}^{(n)} = \{f_{M_i, p}^{rs}(t)^{(n)} \forall r, s, M_i, p \in P_{M_i}^{rs}(t)^{(n)}\}$ 을 n 번째 반복에서 경로교통량벡터라 하자(여기서 $P_{M_i}^{rs}(t)^{(n)}$ 은 지금까지의 반복 과정에서 얻어진 M_i 의 경로 집합). $f_{M_i, p}^{rs}(t)^{(n)}$ 은 경로교통량. 이러한 경로교통량은 DNL을 통하여 링크상에 배정하며 최단경로는 Dijkstra 알고리즘에 의하여 산정한다.

만약 보조 경로가 새롭게 생성되면(즉, $P_{M_i}^{rs}(t)^{(n)} \cap y_{M_i}^{rs}(t)$, 여기서 $y_{M_i}^{rs}(t)$ 는 차종 M_i 의 시간 t에 $r \rightarrow s$ 간의 최단경로), 갱신된 경로 교통량 벡터는 다음과 같이 결정된다.

$$f_{M_i, p}^{rs}(t)^{(n+1)} = \begin{cases} \frac{n}{n+1} f_{M_i, p}^{rs}(t)^{(n)} & \text{if } p \in P_{M_i}^{rs}(t)^{(n)} \\ \frac{1}{n+1} d_{M_i}^{rs}(t) & \text{if } p = y_{M_i}^{rs}(t) \end{cases} \quad \forall r, s, M_i, t \quad (20)$$

구축된 알고리즘의 수렴에 관련된 지표는 Janson (1991)이 제시한 Gap값을 사용한다. Gap함수는 균형 상태에서의 괴리를 나타내는 비균형(disequilibrium)의 측도를 나타내는데 사용된다. 여기서 식(21a)는 경로를 기반으로 표현된 수렴성 지표이고 식(21b)는 링크를 기반으로 표현된 Gap함수이다.

$$\xi = \frac{\int_{t^s} \sum_{M_i} \sum_p c_{p, M_i}^{(n)}(t) (f_{M_i, p}^{rs}(t)^{(n)} - d_{M_i}^{rs}(t)^{(n)})}{\int_{t^s} \sum_{M_i} \sum_p c_{p, M_i}^{(n)}(t) f_{M_i, p}^{rs}(t)^{(n)}} \quad (21a)$$

$$\xi = \frac{\int_{t^s} \sum_{M_i} \sum_a c_{a, M_i}^{(n)}(t) (e_a^{(n)}(t) - \widehat{e}_a^{(n)}(t))}{\sum_{M_i} \sum_a e_a^{(n)} \cdot c_{a, M_i}^{(n)}(t)} \quad (21b)$$

한편, 2장에서 설명한 통행시간의 개념에서 볼 때 예측적 이용자 균형해는 순간적 이용자 균형해와 달리 출발지에서 보면 현재 시점 이전(과거시간대)에 진입한 교통량이지만 링크상에서 보면 현재 시간대의 시점에서 출발한 교통량보다 먼저 링크에 진입하거나 추월로 인하여 대기행렬 구간에 먼저 합류되는 경우에 그렇지 못하게 된다. 가령 $t=0$ 시점의 모든 O-D의 경로 교통수요를 배정하고 이를 기반으로 $t=1$ 시점의 모든 O-D의 경로 교통수요를 배정한 결과 $t=0$ 시점의 교통수요가 선택한 경로상의 어떤 링크에 $t=1$ 시점의 경로 교통수요가 먼저 진입한 경우 $t=0$ 시점의 균형 상태는 예측적 이용자 균형상태에서 보면 비균형 상태가 된다. 이것은 $t=0$ 시점의 교통수요를 배정하는 과정에서는 $t=0$ 시점의 O-D 수요만을 고려하기 때문에 나타나게 된다. 이러한 상황의 확인은 최초의 $t=0$ 에서 알 수 없지만 $t=0$ 의 수요를 배정한 결과를 토대로 $t=1$ 의 수요를 배정한 뒤 $t=0$ 의 수렴성을 재확인하게 되면 $t=0$ 상태의 배정 상태가 비균형 상태임을 확인할 수 있게 된다. 가령 $t=3$ 시점의 수요를 배정하고 나서 $t=0, t=1, t=2$ 의 균형상태를 확인하여 이를 기반으로 재배분하는 과정을 반복하게 되면 모든 시간대의 정확한 예측적 균형해를 찾을 수 있다.

[step 1] (초기화)

- (1.1) 시간증분의 초기화 $t=0$
- (1.2) 반복회수의 초기화 $n=0$
- (1.3) 초기 flow 패턴

초기 네트워크 상태의 통행비용하에서 각 O-D별, 각 차종별 최단경로 교통량 $f_{M_i}^{rs}(t)^{(0)}$ 를 산정하고 이를 이용하여 $e_a^{M_i(n)}(t)$ 를 생성

[step 2] 통행비용의 갱신(cost update)

$e_a^{M_i(n)}(s)$ (if, $s \leq t$) 혹은 $e_a^{M_i(n-1)}(s)$ (if, $s > t$)에 대하여 DNL을 통하여 각 차종별 링크통행비용

[step 3] 방향탐색(direction finding)

산정된 $c_{a, M_i}^{(n)}(t)$ 를 기반으로 최단경로 알고리즘을 이용하여 각 O-D별, 각 차종별 보조경로(auxiliary path) $y_{M_i}^{rs}(t)$ 를 산정하고 이 경로상에 교통량을 배정한 $d_{M_i}^{rs}(t)$ 를 산정

[step 4] 이동크기 결정(move step)

각 O-D별, 각 차종별로 아래의 식을 이용하여 새로운 flow 패턴을 산정

$$f_{M, \beta}^{rs}(t)^{(n+1)} = f_{M, \beta}^{rs}(t)^{(n)} + \frac{1}{n} [d_{M_i}^{rs}(t)^{(n)} - f_{M, \beta}^{rs}(t)^{(n)}]$$

[step 5] 수렴 검사(convergence test)

수렴이 만족되면 $t = t + 1$ 로 하여 (1.2)로 그렇지 않으면 $n = n + 1$ 로 하여 step2로

V. 사례연구

2개의 서로 다른 특성을 지닌 차종(여기서는 승용차와 트럭)이 존재하여 격자형 네트워크에서 이용자 균형을 구한다. 각 차종별 O-D는 1분 단위의 균등분포(uniform distribution)로 기점을 출발하며 그 수효는 알려진 것으로 가정한다. 여기서 네트워크의 특성과 각 차종별 O-D는 <표 1>과 같다.

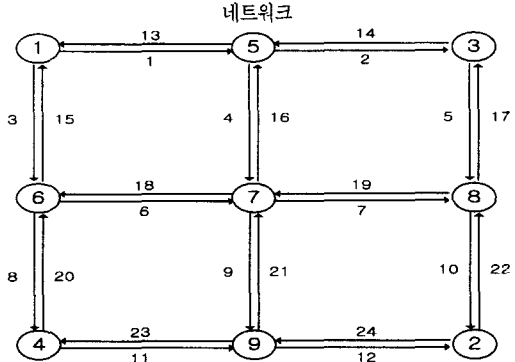
1. 분석결과

분석 결과를 보면 네트워크상에 교통 혼잡이 없는 초기시간대의 경로의 수는 전량배정처럼 2개정도로 나타나다가 시간이 진행되어 혼잡이 가중되면 경로의 수가 4-5개 정도로 분화되고 있어 도로상에서 나타날 수 있는 운전자의 행태를 잘 반영하고 있다.

예측적(predictive) 통행비용의 개념하의 이용자 균형해를 보면 가령 OD1→2에서 이용된 각 시간대별 경로중에서 가장 작은 경로상의 통행시간과 가장 큰 경로상의 통행시간의 차이를 그래프로 표현하였다. 이것은 이용자 균형상태에서는 이용된 경로간 통행시간은 동일한 시간이 되어야 함으로 최대시간과 최소시간을 구분하여 제시함으로써 이용자 균형해의 최대 편차를 표현하고자 함이다. 따라서 <그림 2> 및 <그림 3>을 보면

<표 1> 네트워크 특성 O-D 및 링크 통행비용 함수

승용차 O-D					트럭 O-D				
O-D	1	2	3	4	O-D	1	2	3	4
1	0	300	200	330	1	0	150	100	200
2	310	0	500	340	2	180	0	210	220
3	160	140	0	380	3	70	80	0	180
4	310	350	310	0	4	200	210	150	0



기점	종점	링크	자유통행		C_a	$C_a^{(1)}$ (분)	기점	종점	링크	자유통행		C_a	$C_a^{(1)}$ (분)
			승용차	트럭						승용차	트럭		
1	5	1	2.0	2.4	240	120	5	1	13	1	2.4	240	120
5	3	2	1.8	2.2	240	120	3	5	14	1.5	2.2	240	120
1	6	3	1.5	1.8	200	133	6	1	15	1	1.8	200	133
5	7	4	1.8	2.2	210	120	7	5	16	1	2.2	210	120
3	8	5	1.5	1.8	200	133	8	3	17	1	1.8	200	133
6	7	6	2.0	2.4	240	120	7	6	18	1	2.4	240	120
7	8	7	1.8	2.2	210	120	8	7	19	1.2	2.2	210	120
6	4	8	1.5	1.8	200	133	4	6	20	1.3	1.8	200	133
7	9	9	1.5	1.8	200	133	9	7	21	1.3	1.8	200	133
8	2	10	2.0	2.4	240	120	2	8	22	1.3	2.4	240	120
4	9	11	2.0	2.4	240	120	9	4	23	1	2.4	240	120
9	2	12	1.8	2.2	210	120	2	9	24	1.2	2.2	210	120

통행비용 함수	
승용차	$c_{a, A}(t) = \rho_{aA} [1 + 0.15 \left(\frac{[e_{aA}(t) + v_{aA}(t)] + 2[e_{aA}(t) + v_{aT}(t)]}{C_a} \right)^4] + \frac{L_a [t + r_{aA}(t)]}{C_a^{(1)}}$
트럭	$c_{a, T}(t) = \rho_{aT} [1 + 0.25 \left(\frac{[e_{aA}(t) + v_{aT}(t)] + 2[e_{aT}(t) + v_{aT}(t)]}{C_a} \right)^4] + \frac{L_a [t + r_{aT}(t)]}{C_a^{(1)}}$

주) 여기서, ρ_{aA} , ρ_{aT} = 승용차와 트럭의 자유 통행시간

승용차(v_1)의 경우 10분 시간대에 출발한 교통량에서 가장 큰 차이 1.9분의 오차를 보이고 있어 매우 양호한 균형해 상태에 도달하고 있음을 알 수 있다. 또한 트럭(v_2)의 경우는 9분 시간대의 교통량에서 나타나는 3.3분 정도의 오차가 나타나고 있는데 승용차에 비하여 트럭의 오차가 큰 것은 교통량으로 나타나는 통행시간이 동일한 수준에서 트럭이 보다 민감하게 반응하기 때문이다. 이상에서 제시한 방법보다 보다 일반화된 방

<표 2> Gap 함수에 의한 차종별 시간대별 수렴성 결과

시간대	v_1 의 Gap 값	v_2 의 Gap 값
1	5.361657E-02	8.219759E-04
2	2.772229E-02	8.739902E-04
3	2.303226E-02	8.739902E-04
4	8.922681E-03	1.136240E-02
5	2.202736E-03	3.015014E-03
6	5.536493E-03	7.639448E-03
7	2.878444E-04	9.264766E-05
8	2.591023E-06	2.741005E-05
9	2.307857E-05	2.215411E-05
10	2.289758E-02	9.605075E-03

<표 3> 분석결과(v1)(OD 1→2의 경우)

출발시간	경로(링크번호)			통행시간(분)	도착시간(분)	경로교통량(대)	
1	3	6	9	12	5.3776	5.3776	4.20
1	3	6	7	10	5.2588	5.2588	25.80
2	1	4	9	12	6.4404	7.4404	4.50
2	1	4	7	10	6.2982	7.2982	15.90
2	3	6	9	12	6.4810	7.4810	4.20
2	3	6	7	10	6.3388	7.3388	5.40
3	1	2	5	10	7.6251	9.6251	8.70
3	1	4	9	12	7.2973	9.2973	3.00
3	3	6	9	12	8.6834	10.6834	4.20
3	3	6	7	10	8.2820	10.2820	14.10
4	1	2	5	10	8.8583	11.8583	1.20
4	1	4	9	12	9.0938	12.0938	7.80
4	1	4	7	10	9.3039	12.3039	21.00
5	1	2	5	10	9.9493	13.9493	2.70
5	1	4	7	10	9.7309	13.7309	1.80
5	3	6	9	12	10.7953	14.7953	11.40
5	3	6	7	10	9.8640	13.8640	14.10
6	1	2	5	10	11.4401	16.4401	3.90
6	1	4	9	12	11.3437	16.3437	6.30
6	1	4	7	10	11.5146	16.5146	18.60
6	3	6	7	10	11.5419	16.5419	1.20
7	1	2	5	10	13.2833	19.2833	3.90
7	1	4	7	10	12.2827	18.2827	3.90
7	3	6	9	12	12.2697	18.2697	6.00
7	3	6	7	10	12.4144	18.4144	16.20
8	1	2	5	10	13.5886	20.5886	7.50
8	1	4	9	12	14.7608	21.7608	6.90
8	1	4	7	10	13.5423	20.5423	10.50
8	3	6	7	10	13.6464	20.6464	5.10
9	1	2	5	10	15.1250	23.1250	2.40
9	1	4	7	10	13.8199	21.8199	3.90
9	1	4	9	12	15.0976	23.0976	5.70
9	3	6	9	12	14.6099	22.6099	8.70
9	3	6	7	10	13.3364	21.3364	9.30
10	1	2	5	10	15.2991	24.2991	3.60
10	1	4	7	10	14.8633	23.8633	4.80
10	1	4	9	12	14.7119	23.7119	15.00
10	3	6	7	10	15.2267	24.2267	1.50
10	3	6	9	12	15.1218	24.1218	3.30
10	3	8	11	12	16.8053	25.8053	1.80

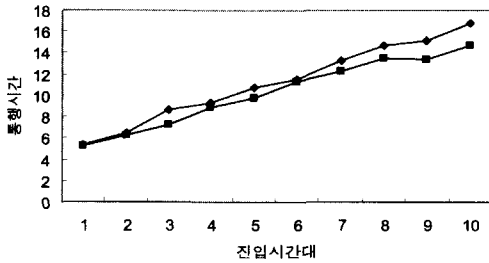
<표 4> 분석결과(v2)(OD 1→2의 경우)

출발시간	경로(링크번호)			통행시간(분)	도착시간(분)	경로교통량(대)	
1	1	4	9	12	6.5140	6.5140	1.95
1	1	4	7	10	6.3936	6.3936	13.05
2	1	2	5	10	8.0426	9.0426	2.55
2	1	4	9	12	7.7084	8.7084	3.30
2	1	4	7	10	7.2901	8.2901	6.00
2	3	6	7	10	8.6098	9.6098	3.15
3	1	2	5	10	9.7258	11.7258	2.25
3	1	4	9	12	11.5271	13.5271	5.40
3	1	4	7	10	10.1255	12.1255	7.35
4	1	2	5	10	10.4656	13.4656	1.80
4	1	4	9	12	11.1569	14.1569	1.20
4	1	4	7	10	10.3670	13.3670	4.65
4	3	6	9	12	11.2376	14.2376	2.10
4	3	6	7	10	10.4477	13.4477	5.25
5	1	2	5	10	14.9246	18.9246	6.90
5	1	4	9	12	13.0469	17.0469	2.25
5	1	4	7	10	14.8378	18.8378	5.85
6	1	2	5	10	15.3873	20.3873	2.10
6	1	4	9	12	18.0702	23.0702	1.05
6	1	4	7	10	15.2082	20.2082	3.60
6	3	6	9	12	18.1338	23.1338	2.70
6	3	6	7	10	15.0097	20.0097	5.55
7	1	2	5	10	15.1993	21.1993	1.35
7	1	4	9	12	18.0374	24.0374	4.35
7	1	4	7	10	15.2237	21.2237	6.30
7	3	6	7	10	15.2558	21.2558	3.00
8	1	2	5	10	15.2779	22.2779	1.65
8	1	4	9	12	18.3379	25.3379	3.45
8	1	4	7	10	15.0909	22.0909	3.60
8	3	6	9	12	18.7023	25.7023	2.25
8	3	6	7	10	15.0165	22.0165	4.05
9	1	4	9	12	18.0188	26.0188	3.60
9	1	4	7	10	15.5039	23.5039	5.70
9	3	6	7	10	15.2136	23.2136	1.35
9	3	6	9	12	18.7185	26.7185	4.35
10	1	4	7	10	15.5758	24.5758	3.45
10	1	4	9	12	18.1228	27.1228	6.00
10	3	6	7	10	16.1317	25.1317	2.55
10	3	6	9	12	18.4505	27.4505	3.00

범이 알고리즘의 수렴 정도를 판단하는 Gap 함수를 이용하는 것이다. 균형상태에서의 괴리를 나타내는 Gap 값을 보면 모든 시간대에서 95%이상의 정밀도가 있음을 알 수 있다.

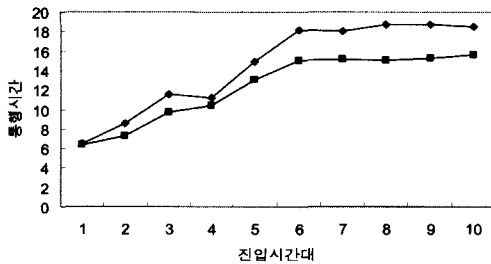
한편, 어떤 링크상에서 교통량의 시간에 따른 변화는 정적배분과 달리 시간에 따라 가감되는 현실 도로망에서의 교통류 패턴을 잘 나타내고 있다.

수단1의 통행시간



〈그림 2〉 시간대별 경로 통행시간 (OD 1→2의 경우)

수단2의 통행시간

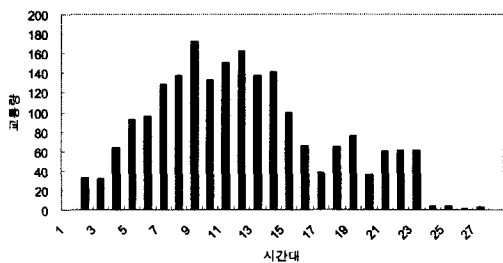


〈그림 3〉 시간대별 경로 통행시간 (OD 1→2의 경우)

〈표 5〉 링크2에서의 시간대별 링크교통량의 변화(대)

시간	유입 교통량	링크 교통량	유출 교통량	시간	유입 교통량	링크 교통량	유출 교통량
1	0.0000	0.0000	0.0000	15	52.2240	99.0180	94.8380
2	32.7800	32.7800	0.0000	16	47.4000	65.2560	81.1620
3	32.1800	32.1800	32.7800	17	13.6040	37.7360	41.1240
4	43.6400	63.6401	12.1800	18	51.0060	64.6100	24.1320
5	63.8701	92.5698	34.9404	19	33.5960	75.6319	22.5741
6	50.1601	96.1701	47.5698	20	2.2680	35.8640	42.0359
7	78.9201	128.5798	45.5104	21	57.8639	59.8799	33.8480
8	58.8560	137.7757	49.6601	22	2.5200	60.3839	2.0160
9	74.2580	171.9336	40.1001	23	0.7560	61.1399	0.0000
10	57.5280	131.9061	97.5555	24	0.7560	3.5040	58.3919
11	84.0560	150.0917	65.8704	25	0.7560	3.5040	0.7560
12	71.3600	162.6159	58.8338	26	0.5040	0.5040	3.5040
13	49.8800	137.6556	74.8403	27	2.0160	2.5200	0.0000
14	47.4920	141.6320	43.5156	28	0.0000	0.0000	2.5200

링크2의 시간대별 교통량변화



〈그림 4〉 링크2에서의 시간대별 링크교통량의 변화

V. 결론 및 향후연구 과제

본 연구에서 검토한 주요 연구 성과는 다중제층을 동적배분 문제에 적용하였다는 것과 동적배분에서 모형의 구축을 위하여 도입된 FIFO의 문제를 완화시켰다는 점을 들 수 있다. 특히 FIFO의 완화는 다양한 형태의 링크통행비용 함수를 통행배분 문제에 적용시킬 수 있게 함으로써 향후 동적 모형연구의 주요한 기폭제로 될 것으로 기대된다. 또한 사례연구 결과를 보면 각 시간대별 경로 통행시간을 보면 완벽한 이용자 균형상태임을 나타내지는 못하고 있어 이에 대한 향후 본원 연구가 필요한 것으로 판단된다.

향후 추가연구가 필요한 분야를 정리하면 다음과 같다. 첫째, 본 연구의 링크통행비용의 산정은 링크상의 교통량을 기준으로 산정하였다. 따라서 교통량 변수를 보다 현실적인 변수로 변경하는 연구가 필요하다. 즉, 밀도의 적용을 생각해 볼 수 있다. 그러나 링크 전체를 밀도로 할 경우 이산화된 시간 구간에서 인접한 시간구간내의 교통량과 시간적으로 멀리 떨어진 시간구간내의 교통량과는 분명한 차이가 있으나 이를 구분하기가 불가능하다. 따라서 이산 시간 구간을 하나의 단위로 하는 밀도를 산정해서 충격과 이론을 적용한 통행비용 산정을 적용할 필요가 있다. 특히 추월에 대한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 추월한 차량에 의한 통행비용의 증가는 고려하지 않았다. 추월차량의 영향이 존재하는지의 여부는 엄밀한 분석이 선행되어야 할 것이다. 둘째, MSA는 휴리스틱한 알고리즘이므로 보다 정교한 해를 도출할 수 있는 최적화 알고리즘의 연구가 필요하다. 셋째, 확률적 통행배분의 네트워크 로딩 과정에서 적용되는 교통수단선택, 경로선택 등을 DNL의 구축 과정에 접합시키는 연구도 필요할 것이다. 이러한 과정은 통행배분 모형의 해의 정밀성을 증가시킬 수 있는 중요한 요인이 될 것으로 판단된다. 넷째, 본 연구에서는 수직적 대기행렬 모형을 적용하였으나 교차로에서의 spill back과 같은 보다 현실적인 묘사가 가능하도록 수평적 대기행렬 모형을 적용할 필요가 있다. 마지막으로 본 연구의 이용자 균형해의 분석결과를 보면 시간대별로 약간의 오차가 발생하고 있다. 따라서 이러한 오차의 완화내지는 제거를 위하여 분석시간 구간을 더욱 작게 하거나 또는 보다 정교한 모형의 구축 및 알고리즘의 개발을 통하여 정교한 균형해가 도출 될 수 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다. 마지막으로 본 연구에서 동적 이용자 균형 상태를 변동부동식

으로 정식화하였고 현재까지는 이러한 정식화 기법이 세계적인 많은 연구에서 적용되고는 있다. 그러나 본 연구의 정식화 과정에서 loading 과정이 구체적으로 반영되지는 않았기 때문에 이를 보완한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 임강원(2002), "동적 통행배정모형을 위한 교통류부하모형의 개발", 대한교통학회, 제20권 제3호, 대한교통학회, pp.149~158.
2. 한상진(2002), "동적 네트워크 로딩방법 및 적용에 관한 연구", 대한교통학회, 제20권 제1호, 대한교통학회, pp.101~110.
3. B. G. Heydecker and J. D. Addison, 1996, "An exact expression of dynamic traffic equilibrium". In: *Transportation and Traffic Theory* (ed. J-B Lesort), Oxford:Pergomon, pp.359~383.
4. B. G. Heydecker and N. Verlander, 1999, "Calculation of dynamic traffic equilibrium assignment", *Proceeding of the European Transport Conferences, Seminar F*, p.434.
5. B. G. Heydecker, and J. D. Addison, 1999, "Dynamic traffic equilibrium with departure time choice", In: *Transportation and Traffic Theory*(ed A Ceder). Haifa, Israel: Transportation Research, Institute, pp.287~316.
6. B. N. Janson, 1991, "Dynamic traffic assignment for urban road networks", *Transportation Research*, 25B(2/3), pp.143~161.
7. Bin Ran, David Boyce, 1996, *Modeling Dynamic Transportation Networks*, Springer.
8. C. Buisson, J.P. Lebacque and J. B. Lesort, 1998, "Travel times computation for dynamic assignment modelling", In: *Transportation networks : Recent methodological advances* (ed. Bell, M.G.H.), Pergomon, pp.303~317.
9. C. Meneguzzer, 1995, "Computational Experiments with a Combined Route Choice and Intersection Control Model with Asymmetric Cost Functions", paper presented at the 4th Intl. Conf. on Applie. od Adv. Technol. to Transp.Eng., Italy.
10. D. K. 1978, "Merchant and G.L. Nemhauser, A model and an algorithm for the dynamic traffic assignment problem", *Transportation Science*, 12(3), pp.183~199.
11. E. D. Romph, 1994, "A dynamic traffic assignment model: Theory and Application", PhD thesis, Delft University of Technology.
12. G. L. Chang, and X. Tao, 1996, "Estimation of dynamic O-D distributions for urban networks", *Proceedings of the 13th International Symposium on Transpotation and Traffic Theory*, Pergomon, pp.1~20.
13. L. M. Wynter, 1995, "Advances in the theory and application of the multiclass traffic assignment problem", PH.D. thesis, Dept. Transport, ECOLE NATIONALE DES POINT ET CHAUSSEES, pp.161~207.
14. M. Kuwahara, and T. Akamatsu, 1997, "Decomposition of the reactive dynamic assignment with queues for a many-to-many origin-destination pattern", *Transportation Research*, 31B(1), pp.1~10.
15. Papageorgiou, 1990, "Dynamic modelling, assignment, and route guidance in traffic networks", *Transportation Research*, 24B(6), pp.471~495.
16. R. Jayakrishnan, W. K. Tsai, and A. Chen, 1995, "A dynamic traffic assignment model with traffic-flow relationships", *Transportation Research*, 3C(1), pp.51~72.
17. S. Han, 2000, "Dynamic Traffic Assignment Techniques for General Road Networks", PhD, thesis, University College of London.
18. T.L. Friesz, Bernstein, D., Smith, T.E., Tobin, R.L., and Wie , B., 1989, (1993) "A variational inequality formulation of the dyanamic networks user equalibrium problem", *Operation Research*, 41(1), pp.179~191.
19. V. A. Astarita, 1996, "Continuous time link model for dynamic network loading based

travel time functions", In: Transportation and Traffic Theory(ed. J-B Lesort). Oxford : Pergamon, pp.179~102.

20. W. H. Lin, and H. K. Lo, 2000, "Are the object

and solution of dynamic user equilibrium models always consistent?", Transpotation Research, 34A, pp.137~144.

♣ 주 작 성 자 : 강진구

♣ 논문투고일 : 2004. 5. 21

논문심사일 : 2004. 7. 15 (1차)

2004. 8. 4 (2차)

2004. 8. 18 (3차)

심사판정일 : 2004. 8. 18

♣ 반론접수기한 : 2005. 2. 28