

■ 論 文 ■

도착시간 기준 기종점표를 이용한 동적통행배정

Dynamic traffic assignment based on arrival time-based OD flows

김 현 명

(Assistant Professor, Asian Institute of Technology)

목 차

- I. 서론
- II. 도착시간기준 동적통행배정 모형
 - 1. 기존 동적통행배정 모형의 문제점
 - 2. 도착시간기준 동행배정모형 개발
- III. 수학 구성식
 - 1. Variational inequality 기법
 - 2. GLS 기법
- 3. FIFO violation 기법
- IV. 계산 결과
 - 1. 예제 교통망 1
 - 2. 예제 교통망 2
- VII. 결론
- 참고문헌

Key Words : 희망도착시간, 동적통행배정, 행동기반 통행수요 분석, 도착시간기준 기종점 통행수요, GLS 함수
 Dynamic traffic assignment, departure time choice, preferred arrival time, GLS function, FIFO violation function

요 약

현재 이용되는 모든 동적 통행배정모형들은 출발시간을 기준으로 기종점간의 통행량을 정의하고 있다. 하지만, 동적 OD가 출발시간을 통행수요의 동적 기준점으로 이용하는 것은 동적 통행배정 모형의 계산상 편의를 위한 것이다. 즉, 통행이 활동참여를 위해 발생하고 종료된다는 것을 고려하면 이러한 출발시간 기준 기종점표는 모든 종류의 통행들에 적용될 수는 없다. 예를 들어, 오전의 출근통행은 업무개시시간을 고려한 희망 도착시간이 기준시간이 되고, 통근자들이 가정을 떠나는 출발시간은 희망도착시간과 예상 기종점 통행시간을 고려해 결정되는 것이다. 그러나 현재 개발되어 있는 모든 동행배정기법들은 출발시간으로부터 시간의 흐름에 따라 기점에서 종점으로 통행을 이동시키기 때문에, 통행수요를 종점 희망도착시간을 기준으로 역방향 계산을 할 수 없다. 따라서 현실과 동일한 결정과정을 통해 동적 동행배정을 할 수 있는 모형은 아직 개발되지 않았다. 본 연구에서는 이러한 문제인식 아래 희망도착시간을 기준으로 정의된 동적 기종점표를 교통망에 부하할 수 있는 동적 동행배정모형을 개발하였다. 개발된 모형은 희망도착시간분포와 예상 경로 통행시간을 이용하여 출발시간분포를 갱신하는 방법을 이용하였으며, GLS 함수를 통해 수학적식을 구성하였다. 개발된 모형은 두 가지의 소규모 교통망들에 적용되어 그 성능을 확인하였다.

A dynamic traffic assignment (DTA) has recently been implemented in many practical projects. The core of dynamic model is the inclusion of time scale. If excluding the time dimension from a DTA model, the framework of a DTA model is similar to that of static model. Similar to static model, with given exogenous travel demand, a DTA model loads vehicles on the network and finds an optimal solution satisfying a pre-defined route choice rule. In most DTA models, the departure pattern of given travel demand is predefined and assumed as a fixed pattern, although the departure pattern of driver is changeable depending on a network traffic condition. Especially, for morning peak commute where most drivers have their preferred arrival time, the departure time, therefore, should be modeled as an endogenous variable.

In this paper, the authors point out some shortcomings of current DTA model and propose an alternative approach which could overcome the shortcomings of current DTA model. The authors substitute a traditional definition for time-dependent OD table by a new definition in which the time-dependent OD table is defined as arrival time-based one. In addition, the authors develop a new DTA model which is capable of finding an equilibrium departure pattern without the use of schedule delay functions. Three types of objective function for a new DTA framework are proposed, and the solution algorithms for the three objective functions are also explained.

I. 서론

1970년대 후반 원시적인 개념과 수학식들이 제시된 이래, 교통망 연구자들에 의해 다양한 동적통행배정모형이 개발되어왔다. 초기 동적 통행배정 관련 연구들은 동적 이용자 평형(DUE)에 기초한 이론적 수학모형 개발에 집중되었다. 많은 연구자들은 평형상태를 찾을 수 있는 목적함수의 개발과 해도출 알고리즘의 개발에 많은 노력을 기울였으며(Janson, 1991; Jayakrishnan et al., 1995; Kuwahara and Akamatsu, 1997), Ran and Boyce(1996)과 Chen(1999)에 이르러 그 이론적인 성과와 한계가 밝혀졌다. 수하이론에 기반을 두고 많은 목적함수가 개발되었으나, 동적 통행배정에 이용되는 통행비용함수나 통행시간 계산기법의 성질 상 개발된 목적함수들을 통해서는 동적 이용자평형해가 유일하게 결정될 수 없다는 사실이 밝혀졌다. 더욱이 교통류이론이 통행배정 모형에 수용되면서 동일한 시간대에 출발한 차량들이 통행 중 분산되어 상이한 시간대에 도착하게 되었다. 따라서 동일한 시간대에 출발한 차량들이 동일한 시간에 종점에 도착한다는 동적 이용자평형의 개념은 더 이상 유효하지 않게 되었다.

이러한 동적 이론모형의 한계에 대한 이해와 교통 엔지니어들의 현실적 필요증대에 따라 1990년대 중반 이후 DYNASMART-P(2004)나 PARAMICS(2008) 같은 다양한 상업모형들이 시장에 출시되면서 현재는 실용적인 과제해결에도 동적 시뮬레이션 모형이 다양하게 이용되고 있다(천승훈 등, 2001; Shin et al., 2002; 송성주 등, 2004). 특히, 최근 들어 항공사진이나 위성 사진과 같이 교통망구축시간을 크게 단축할 수 있는 보조자료들이 쉽게 구득 가능해지고, 통행시간, 통과 교통량과 같은 동적 OD 추정이나 결과 정산을 위한 자료들에 대한 자동 수집기술이 발전하면서 동적 교통망 모형 구축이 향후 더욱 일반화될 것으로 기대된다.

하지만, 현재의 동적 통행배정 모형은 실제 현실의 동적 통행패턴 발생과정과는 상이한 성질을 가지고 있다. 활동기반 연구에서 주장하듯 모든 통행들은 활동참여를 위해 발생하는 파생수요이다. 따라서 업무 개시와 같이 활동의 시작 시점이 정해진 경우 통행자들은 종점에 대한 희망 도착시간을 갖게 된다. 그리고 이 희망도착시간과 예상 기종점 통행시간을 이용해 언제 집에서 출발할 것인지를 결정하는 것이다. 따라서 도로망 개선이나 혼잡통행료 징수와 같이 교통망의 통행시간을 변경할 수 있는

교통계획 대안의 평가를 위해서는 동적통행배정모형은 희망도착시간과 기종점 통행시간을 이용해 출발 통행분포를 변경할 수 있는 계산과정을 갖추고 있어야한다. 하지만 현재 상용화된 시뮬레이션 패키지들은 출발시간 선택모형을 가지고 있지 않다. 일부 연구에서는 Schedule delay 함수를 이용해 출발시간을 선택할 수 있는 방법을 제시하였으나(Ran and Boyce, 1996; Chen, 1999), 이 함수는 정산이 매우 어려운 문제가 있다. 예를 들어 변완희 등(2005) 운전자의 Schedule delay가 통행의 특성, 운전자의 사회경제적 배경에 따라 다양한 형태를 갖는다고 주장한 바 있다. 또, 동적 기종점표가 출발시간에 대해 정의되어있는 경우 기 정의된 출발시간분포와 Schedule delay 함수에 의해 조정되는 과정간의 관계를 어떻게 해석해야 할지도 명확하지 않다.

본 연구에서는 이에 대한 보다 근본적인 해법을 제시한다. 즉, 통행자들이 희망하는 도착시간의 분포가 주어졌을 때, 이를 고려해 동적 통행패턴과 기종점간 출발시간 분포를 동시에 결정할 수 있는 방법론을 제시한다. Schedule delay 함수가 임의로 가정된 함수형태와 정산이 필요한 파라미터들을 다수 포함하고 있는 반면, 희망 도착시간 분포는 통행자들로부터 직접 샘플조사를 하여 파악하거나 활동 개시시간에 대해 직장이나 소포센터 등의 업무 스케줄 조사를 통해 정보 확보가 가능하기 때문에 이전 기법들보다 더 간편하고 방법론적 관점에서도 현실의 과정에 유사하다고 할 수 있다. 위에서 제시한 개념을 기반으로 수학적 해를 도출할 수 있는 수학적 구성식과 해도출 알고리즘을 개발하였으며, 개발된 모형은 두 종류의 교통망에서 실험되어 그 실용성을 확인하였다.

II. 도착시간기준 동적통행배정 모형

1 기존 동적통행배정 모형의 문제점

통행OD의 시간기준을 어떻게 결정할 것인가는 동적 통행배정 모형의 개발단계에서 핵심적인 문제이다. 우리가 동적통행배정 모형을 이용하는 이유가 통행패턴의 동적인 분석을 위한 것이며, 그 통행의 동적 패턴을 교통망 위에 만들어내는 것이 바로 통행의 출발패턴이기 때문이다. 하지만 교통망 이론가들은 동적통행배정 모형의 개발 초기부터 출발시간을 통행OD의 시간기준으로 사용해왔다. 거기에는 두 가지 이유가 있다.

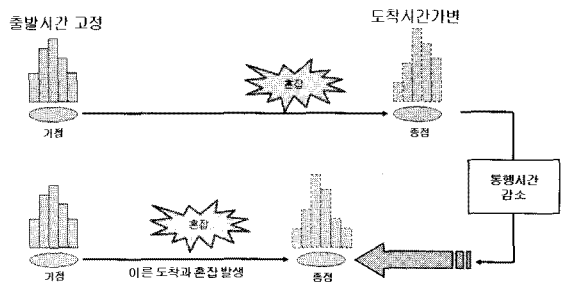
첫 번째 이유는 동적 이용자평형 개념이다. 동적 이용

자평형 상태는 정적 이용자평형 상태를 동적으로 확장한 개념으로, 동일한 기종점사이를 운행하는 차량들은 동일한 시각에 기점을 출발할 경우 어떠한 경로를 이용하더라도 동일한 시각에 종점에 도착하는 상태이다. 이때, 개별 운전자들은 임의로 경로를 변경해 자신의 도착시간을 앞당길 수 없다(Chen, 1999). 이때, 동적 이용자평형 상태를 찾기 위한 모든 최적화식들은 출발시간을 이용해 정의된다. 따라서 이 식들의 입력변수인 동적 OD표 역시 출발시간을 기준으로 정의되는 것이 편리하다.

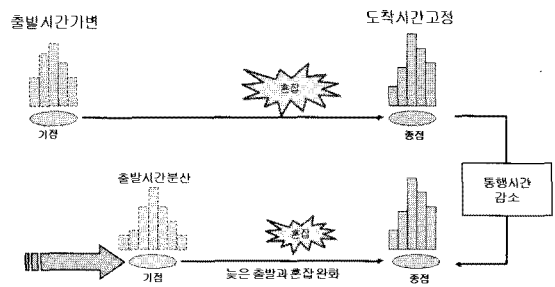
두 번째 이유는 계산과정의 편리성이다. 동적 통행배정 모형이나 시물레이션 모형은 시간의 흐름에 따라 차량을 진행시킨다. 그리고 많은 계산과정이나 제약식들도 시간이 흐름에 따라 만족되거나 정의되도록 설계되어있다. FIFO(First-In-First-Out) 제약은 대표적인 예라 할 수 있다. 그런데, 만약 도착시간을 고정시킨 기종점 통행을 도로망에 부하하려 한다면 이러한 제약식들이나 수식들이 모두 변형되어야 한다. 하지만, 이러한 역 인과 관계를 구축하는 것은 수학적 모형에도 어렵고, 시물레이션 모형에서는 거의 불가능하다.

그렇다면 출발시간이 고정되어 있는 OD표를 이용하는데 따른 문제점은 무엇일까? <그림 1>에서 그 해답을 찾을 수 있다. 모든 차량들의 출발시간을 고정시킨 상태에서 도로망을 개선시켰다고 가정해보자. 통행시간의 감소에 따라 차량들은 더 빨리 종점에 도착하게 된다. 이러한 현상은 만약 현재의 통행이 퇴근과 같이 기점에서의 출발시간이 고정되어 있다면 현실적이다. 일반적으로 업무활동의 경우 퇴근시간이 고정되어 있고, 업무가 종료됨과 동시에 근로자들은 통행을 시작한다. 하지만, 오전 출근시간대의 경우 사람들은 통행시간이 감소할 경우 집에서 출발하는 시간을 늦출 것이다.

대부분의 경우 사람들은 감소된 통행시간을 노동에 투입하지는 않을 것이다. 대부분의 근로자들은 소득이 높을수록 고정된 업무 스케줄을 갖고 있으며, 노동 시간을 늘리더라도 소득을 높힐 수 없다. 또, 대부분의 직장에서는 근로자가 원하는 시간에 노동시간을 늘리더라도 추가 소득이 발생하지는 않는다. 따라서 통근시간의 감소는 여가시간이나 다른 목적으로 사용된다고 예상하는 것이 합리적이다. 하지만, <그림 1>과 같이 출발시간이 고정되는 경우 통행시간이 감소하면 차량들이 종점에 도착하는 시간이 감소된 통행시간만큼 앞당겨진다. 이에 따라, 교통망에서 발생하는 혼잡의 발생시간대 역시 더 이른 시간대로 이동하게 된다. 이러한 혼잡의 동적 발생



<그림 1> 예제교통망 1에서 모형의 수렴 (희망도착분포와 계산된 분포간 차이)



<그림 2> 교통망 개선의 실제 효과

패턴은 실제 예상되는 패턴과는 상이한 것이다. 또, 현실에서는 통행자들이 선택 가능한 출발시간대가 확대되기 때문에 출발분포의 분산이 더 확대될 가능성이 높다. 하지만, 출발시간이 고정된 시물레이션의 경우 차량의 도착 분포가 분산될 뿐 출발시간 분포는 변화가 없다. 그 실제 효과는 <그림 2>에 예시하였다.

앞에서 설명한 바와 같이 출발시간 고정 OD의 경우 퇴근통행은 합리적으로 모형화 할 수 있다. 하지만, 출근통행은 설명이 불가능하다. 반대로, 도착시간 고정 OD를 사용하는 경우에는 퇴근통행의 현실적 행태를 재현하기 어렵다. 이 문제는 현재의 통행패턴을 재현하는 과정에서는 크게 문제가 되지 않는다. 예를 들어 통행시간과 링크 관측교통량을 통해 동적 교통망을 구축한 경우, 시물레이션 모형은 현재 교통망의 동적 혼잡패턴을 그대로 재현할 것이다. 하지만, 교통망의 통행환경에 변화가 발생하는 경우, 위의 행태가 적절하게 모형화되지 않는다면 합리적인 동적 통행패턴의 재현은 불가능하다. 이 단점은 동적 통행배정 모형을 교통계획에 적용하는데 치명적인 단점이 된다. 동적 통행배정모형을 이용하는 가장 큰 이유는 통행패턴의 동적 상태를 정확히 파악하기 위해서이다.

이러한 문제를 근본적으로 해결하는 방법은 행동기반 시물레이션 모형을 이용하는 것이다. 예를 들어, Kim(2008)

이 개발한 DYNAHAP와 같이 모든 통행을 활동에 의해 발생시키는 모형의 경우 OD의 시간차원을 정의할 필요가 없기 때문에, 앞에서 설명한 모든 동적 선택 행태를 재현할 수 있다. 모든 통행자들은 자신들의 주어진 활동 스케줄을 위배하지 않도록 자신들의 출발시간을 선택한다. 하지만, 통행기반의 통행배정 모형에서는 활동을 내재적으로 포함하는 것은 불가능하다. 따라서 교통계획에 이용할 수 있는 올바른 동적 통행배정 모형을 개발하기 위해서는 각 통행모형의 형태에 따라 출발시간과 도착시간 각각을 적절히 고정된 뒤 교통망에 부하할 수 있는 모형을 개발해야 한다.

2. 도착시간기준 통행배정모형

새로운 동적 통행배정모형의 개발은 기존 동적 평형 개념의 검토부터 시작해야 한다. Chen(1999)가 밝힌바와 같이 동적 이용자 최적 조건에서는 각 기중점 쌍에 대해 동일한 시간대에 출발한 통행자들이 경험하는 실제 통행 시간은 같고 그 값은 최소이다(동적이용자평형, DUE). 또, 어떠한 통행자도 일반적으로 그들의 경로를 변경하여 그들의 통행시간을 개선할 수 없다(동적이용자최적). 이를 수학적으로 나타내면 다음과 같다(Chen, 1999).

$$\begin{aligned} c_k^{ij}(t_{dp}) &= \pi^{ij}(t_{dp}) & \text{if } f_k^{ij}(t_{dp}) > 0 \\ c_k^{ij}(t_{dp}) &\geq \pi^{ij}(t_{dp}) & \text{if } f_k^{ij}(t_{dp}) = 0 \quad \forall i, j, k, t_{dp} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $\pi^{ij}(t_{dp}) = \min_k \{c_k^{ij}(t_{dp})\}$.

위 식에서 $c_k^{ij}(t_{dp})$ 는 출발시간 t_{dp} 에 출발했을 때, 기중점 ij 간 경로 k 의 통행 비용(시간)을 의미한다. $\pi^{ij}(t_{dp})$ 는 t_{dp} 에 출발했을 때 기중점 ij 간 최소 통행시간을 나타내며, $f_k^{ij}(t_{dp})$ 는 출발시간 t_{dp} 동안 경로 k 를 출발하는 경로 교통량을 나타낸다. 식(1)에서 보느냐와 같이 DUE는 출발시간을 기준으로 정의되어 있다. 새로운 동적 통행배정 모형을 위해 DUE는 도착시간(t_{ar})으로 다시 정의되어야 할까? 그렇지 않다면 출발시간 기준의 DUE 조건을 새로운 도착시간 기준 동적 통행배정모형에서 쓸 수 있을까?

이를 확인하기 위해 모든 차량들이 출발시간에 따라 정의되는 DUE조건을 만족하는 경우를 가정해보자. 이 경우 모든 중점에서 도착교통량의 큰 분산은 없어야 한

다. DUE조건이 만족되기 위해서는 동일한 시간대에 출발한 모든 차량들은 중점에 동일한 시간대에 도착해야 한다. 만약 FIFO 조건이 적용되지 않는다면, 연속된 두 출발 시간간격 동안 출발한 차량들은 동일한 시간대에 도착할 수 있다. 이러한 경우 동일한 시간대에 출발한 차량들도 서로 다른 시간대에 출발할 수 있는 것이다. 그러나 교통류 전파 계산 시 FIFO 조건이 적용된다면 DUE 상태에서 빠른 시간대에 출발한 차량은 더 늦은 시간대에 출발한 차량에 비해 더 늦게 중점에 도착할 수 없다. 이러한 연역적 추리과정에 따라 우리는 출발시간 기준 DUE가 만족되는 경우 도착시간 기준 DUE도 만족된다는 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 도착시간 기준 동적 통행배정모형의 개발을 위해 기존 DUE 조건을 변경할 필요는 없다. 아래와 같이 도착시간을 기준으로 한 DUE 조건을 정의할 수는 있으나 수학적으로 이 규칙은 FIFO 제약이 적용될 때 식(1)과 동일하다.

1) 도착시간 기준 동적 이용자 평형 (DUE principle based on arrival time)

도착시간 기준 동적 이용자 평형상태에서는 동일한 기중점간을 통행하며 동일한 시간간격에 도착하는 차량들이 이용한 경로의 통행시간은 모두 같아야 하며, 그 통행시간은 이용되지 않은 경로의 통행시간에 비해 작아야 한다.

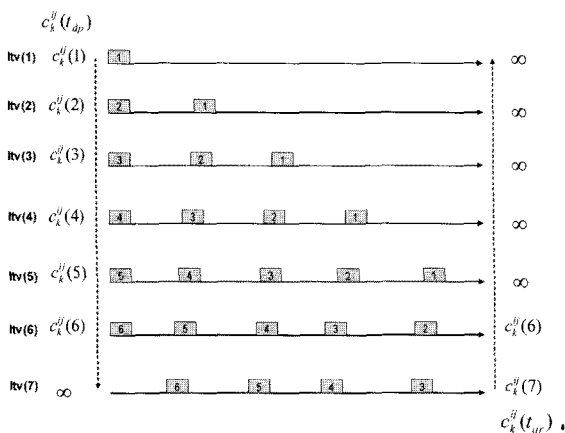
도착시간 기준의 동적 통행배정 모형의 구축을 위해 직면하는 두 번째 질문은 최적화식 내의 변수 정의에 대한 것이다. 표준 동적 통행배정 모형은 두 종류의 변수를 가지고 있다: 1) 교통류변수, 2) 통행시간 변수. 예를 들어 경로기반의 변수들을 이용해 변동부등식(Variational Inequality)을 구성하였다면, 목적함수 값을 계산하기 위해서는 동적 경로교통량이나 경로 통행시간이 필요하다. 물론 현재까지 모든 모형들은 출발시간을 기준으로 정의된 변수들을 이용해왔다. 도착시간 기준 OD를 부하할 수 있는 동적 통행배정 모형을 구축하기 위해서는 이러한 변수들까지 도착시간을 기준으로 재정의해야 할까? 이러한 변수들을 도착시간 기준으로 정의하는 것이 가능한가?

개념적으로 이러한 정의는 가능한 것으로 보이지만, 이는 이러한 변수를 이용하는 모형의 형태가 어떠한가에 더 큰 영향을 받는다. 차량의 도착시간에 의해 정의되는 경로통행시간을 $c_k(t_{ar})$ 이라 정의하자. 만약 시뮬레이션 모형을 사용하거나 현장자료가 이용가능하다면, $c_k(t_{ar})$ 는 $c_k(t_{dp})$ 와 같이 계산할 수 있다. 김지홍 등(2005)은 교통망 내 실제 통행수요를 고려해 중점 도착예정시간을

추정하는 알고리즘을 개발한 바 있다. 하지만, 해석적인 동적 통행배정 모형에서 이를 계산하려면, 도착교통량과 통행시간간의 관계 정의를 필요로 하는데, 도착시간을 기준으로 함수식을 정의하는 것은 매우 어렵다. 이에 반해 시물레이션 모형의 경우 출발시간 기준 경로통행시간과 도착시간 기준 경로통행시간을 결정하는데 통행시간 함수를 필요로 하지 않기 때문에 그 계산이 어렵지 않다.

해석적인 동적 통행배정 모형에서 이용되는 통행비용 함수의 주 독립변수는 각 시간대 링크의 유입교통량이다. 각 시간대 링크로 유입되는 모든 차량들과 유출되는 차량들을 통해 비용함수는 이번 시간대 유입된 차량들이 언제 링크에서 빠져나갈지를 결정한다.

〈그림 3〉은 동적 통행시간이 어떻게 결정되는지를 보여준다. 출발시간 기준 통행시간의 경우 유입 차량이 존재해야 정의되기 때문에, 시간대 1에서 6까지만 동적 통행시간이 계산 가능하다. 예를 들어 차량 1의 동적 통행시간은 첫 번째 시간대에 진입해 5번째 시간대까지 링크에 존재하였기 때문에 5 time intervals이다. 만약 복수의 차량들이 진입하였다면 이들을 유출시간을 통해 차량의 평균 통행시간을 얻을 수 있다. 이러한 계산 방법은 시물레이션이든 통행시간 함수를 이용하는 해석적 모형이든 동일하다. 따라서 출발시간 기준의 동적 통행시간은 〈그림 3〉의 경우 시간대 1에서 6까지만 정의가 가능하다. 반대로 도착시간을 기준으로 통행시간을 정의하는 경우에는 시간대 1부터 5까지는 동적 통행시간을 정의하는 것이 불가능하다. 이 시간대들에는 링크에서 유출되는 차량들이 존재하지 않기 때문이다. 따라서 동적 통행시간의 경우 모든 시간대들에 대해 존재하지 않는 것이 일반적이다.



〈그림 3〉 출발시간과 도착시간으로 정의되는 동적 통행시간

위와 같은 과정을 통해 동적 통행배정 모형을 구축할 수 있다. 시물레이션 모형을 이용하는 경우 전통적인 변동부동식을 적용하는 것은 간단하다. 도착시간 기준 경로 교통량과 경로 통행시간을 이용하면 새로운 변동부동식을 구성할 수 있다. 그러나 해석적 모형의 경우 도착시간 기반의 통행시간 함수를 개발해야하는데, 이는 거의 불가능하다. 동적 통행배정 모형의 경우 교통류 부하를 위한 계산 방향은 시간의 흐름과 동일하다. 즉, 이러한 함수식의 경우 과거의 통행패턴이 결정되어야 현재의 통행패턴과 통행시간이 필요한 것이다. 따라서 도착시간 기준의 기종점 교통량을 종점으로부터 기점으로 부하하는 경우에는 미래의 시간대로부터 최초의 시간대로 통행시간을 결정해야 하는데 이러한 인과관계의 설정은 불가능하다.

이에 대한 해결책으로 쓸 수 있는 방법이 Bi-level 접근법이다. 상위 레벨에서는 기종점간의 최단경로가 찾아진다. 만약 각 차량들이나 기종점 교통량의 희망 도착시간이 있다면 이 최단 통행시간을 기준으로 하여 기점에서의 출발시간을 결정할 수 있다. 만약 상위레벨에서 이렇게 출발시간과 경로가 고정된다면 전통적인 동적 통행배정 기법을 이용해 하위 레벨에서 교통량 부하를 할 수 있다.

이렇게 상·하위 과정이 끝나면 주어진 도착분포와 계산에 의한 도착분포를 비교해야 한다. 만약 그 편차가 크지 않거나, 주어진 기준 이하라면 Bi-level 과정은 중지한다. 이때, 계산된 출발분포는 기종점간의 통행시간에 의해 결정된 것이다. 따라서 출발분포가 크게 변하지 않거나 도착 분포가 변하지 않는 경우, 기종점 통행시간이 안정화되었음을 의미하는 것이다.

동적 통행배정을 위한 Bi-level 기법은 Janson(1991)에 의해 처음 제시된 것이다. Janson(1991)의 경우 동적 통행배정 모형은 상위에 설정되었다. 반대로, Jayakrishnan(1995)의 경우 동적 통행배정모형을 하위문제에 설정하였으며, 경로 교통량을 계산한 뒤 고정하는 것은 상위문제의 몫이 된다. 정확한 동적 이용자 평형해를 찾기 위해서는 이러한 고정과정이 상위에 위치해야 하위문제에서 부하된 결과와 상위문제에서 계산된 결과간의 일차를 항상 보장할 수 있다. 이러한 점에서 Jayakrishnan(1995)의 Framework이 Janson(1991) 보다는 더 바람직하다고 할 수 있다. 하지만, 대부분의 경우 충분한 수렴상태에 도달하면 두 방법들에 의한 통행패턴은 유사하다.

결론적으로, 시물레이션을 이용할 경우 도착시간을 기준으로 정의된 목적함수도 이용 가능하다. 하지만 해

석적 방법을 이용하는 경우 도착시간을 기준으로 정의된 통행시간 함수가 없기 때문에 도착시간 기준 목적함수를 이용할 수 없다. 하지만, 두 경우 모두 실제 통행배정을 행할 때는 Jayakrishnan(1995)과 같이 Bi-level 기법을 이용해야 한다. 차량을 교통망에 부하하기 위해서는 먼저 차량의 출발시간을 일시적으로 고정시켜야 한다. 이 고정된 출발 패턴을 통해 전통적인 출발시간 기반 동적 통행배정은 차량을 교통망에 부하한다. 이를 통해 경로의 통행시간과 기종점간 통행시간이 계산되면, 출발패턴은 수렴할 때 까지 갱신할 수 있다. 다음 장에서는 도착시간 기반의 동적 통행배정을 위한 수학적 모형들을 제시한다.

III. 수학적 구성식

1. Variational inequality 기법

동적 이용자평형의 규칙은 도착시간을 기준으로 식(2)와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 c_k^{jj}(t_{ar}) &= \pi^{jj}(t_{ar}) & \text{if } f_k^{jj}(t_{ar}) > 0 \\
 c_k^{jj}(t_{ar}) &\geq \pi^{jj}(t_{ar}) & \text{if } f_k^{jj}(t_{ar}) = 0 \quad \forall i, j, k, t_{dp}
 \end{aligned} \tag{2}$$

여기서, $\pi^{jj}(t_{ar}) = \min_k \{c_k^{jj}(t_{ar})\}$.

위의 조건식에 의해 식(2)에 기반한 VI formulation은 아래와 같이 유도된다.

$$\sum_{ij \in OD} \sum_{a \in tk \in K} c_k^{jj}(t_{ar}) \cdot (f_k^{jj}(t_{ar}) - f_k^{j*}(t_{ar})) \geq 0 \tag{3}$$

식(3)은 일반적으로 VI formation을 푸는데 이용되는 Hearn(1982)에 의해 개발된 Gap minimization 등의 방법에 의해 해를 얻을 수 있다. 앞에서 밝힌바와 같이 시뮬레이션 기법을 이용하는 경우 직접 변수들의 값을 결정할 수 있지만(김현명 등, 2001), 해석적 모형을 이용하는 경우 통행시간 함수를 도착시간 기준으로 계산할 수 없기 때문에 도착시간 기준의 변수들의 값을 출발시간 기준 변수들을 통해 역으로 추정해내야 한다.

$$c_k^{jj}(t_{ar}) = c_k^{jj}(t_{dp}) + c_k^{jj}(t_{dp}) \tag{4}$$

$$f_k^{ij}(t_{ar}) = f_k^{ij}(t_{dp}) + c_k^{ij}(t_{dp}) \tag{5}$$

따라서 식(3)은 아래와 같이 변형된다.

$$\sum_{ij \in OD} \sum_{a \in tk \in K} c_k^{jj}(t_{dp}) \cdot (f_k^{ij}(t_{dp}) + c_k^{jj}(t_{dp}) - f_k^{j*}(t_{dp}) + c_k^{j*}(t_{dp})) \geq 0 \tag{6}$$

subject to

$$\sum_{k \in K} f_k^{ij}(t_{dp}) + c_k^{ij}(t_{dp}) = T^{ij}(t_{ar}) \tag{7}$$

이때, $T^{ij}(t_{ar})$ 는 시간대 t_{ar} 동안 도착하는 기종점 ij의 교통량이다. Gap function을 통해 식(6)을 위한 경로 교통량을 반복 갱신 할 수 있다. 이를 위한 Gap function은 아래와 같이 구성된다.

$$\begin{aligned}
 Min \sum_{ij \in OD} \sum_{a \in tk \in K} c_k^{jj}(t_{dp}) & \tag{8} \\
 \cdot \{ f_k^{ij}(t_{dp}) + c_k^{jj}(t_{dp}) - f_k^{j*}(t_{dp}) + c_k^{j*}(t_{dp}) \}
 \end{aligned}$$

도착시간 기준의 경로 교통량과 통행시간을 계산하면 식(8)의 Gap function 값을 얻을 수 있다. 이 Gap function 값은 Bi-section method와 같은 전통적인 선형탐색기법(Line-search method)를 이용해 최소화시킬 수 있다. 즉, Convex combination method와 같이 UE문제를 풀기위해 전통적으로 이용되던 방법들이 식(8)의 해를 찾는데 이용 가능하다.

2. GLS(General least square) 기법

Bi-level 형태의 해법을 개발된 VI 기반의 동적 통행배정 모형에 적용하는 경우, 핵심은 도착시간 기반의 변수들의 값을 계산하는 것이다. 식(4)와 식(5)에서와 같이 각 변수들은 경로통행시간을 통해 정의된다. 이때, 경로 통행시간은 평형상태에서 결정적인 값으로 계산되며, 그 값은 유일한 값으로 결정된다고 가정한다. 또, 그 값은 안정적인 해 탐색과정을 보장하기 위해서는 출발 교통량의 변화에 대해 너무 민감하게 변화해서는 안 된다. 그러나 대부분의 경우 경로 통행시간은 경로 교통량의 변화에 민감하며, 이는 경로 교통량의 갱신과정에서 큰 변화를 야기하기 때문에 전체 해 탐색 과정을 불안하게 만든다.

또 다른 문제는 링크 유출용량에 제한이 있다는 점이다. 이 경우 동일한 기점을 동일한 시간대에 출발한 차량들도 종점에 동일한 시간대에 도착하지 못할 가능성이 높다. 이 경우, 평형상태에서의 경로 통행시간이나 기종점 통행시간은 단일 값으로 결정되지 못한다. 따라서 최적의 출발 교통량을 계산된 통행시간을 통해 얻는 것은 어렵다. 이에 대한 해법으로 제시할 수 있는 것이 동적 OD 갱신기법을 이용하는 것이다. 즉, 시뮬레이션을 통해 얻은 도착교통량($\widehat{T}^{ij}(t_{ar})$)과 주어진 도착시간 기반의 OD 통행량($\overline{T}^{ij}(t_{ar})$)을 통해 GLS 함수를 식(9)와 같이 구성할 수 있다.

$$Z = \text{Min} \sum_{ij \in OD_{t_n} \in T} \left\{ \widehat{T}^{ij}(t_{ar}) - \overline{T}^{ij}(t_{ar}) \right\}^2 \quad (9)$$

여기서, $\widehat{T}^{ij}(t_{ar})$ 는 출발시간 기준의 OD 통행 ($T^{ij}(t_{dp})$)을 통해 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\widehat{T}^{ij}(t_{ar}) = \sum_{t_{dp} \in T} T^{ij}(t_{dp}) \cdot \Phi^{ij}(t_{dp}, t_{ar}) \quad (10)$$

식(10)에서 $\Phi^{ij}(t_{dp}, t_{ar})$ 은 시간대 t_{dp} 에 기점을 출발한 OD 통행량 중 어느 정도 비율의 차량들이 그들의 종점에 시간대 t_{ar} 동안 도착하는지를 나타내는 비율이다. 다시 말하면 이 값은 기종점 통행시간의 분포를 나타낸다. 만약 링크의 용량제약이 없다면 이 값은 유일한 값으로 정의될 수 있다. 하지만, 용량 제약이 존재한다면 동일한 시간대에 출발한 차량들은 동일한 시간대에 도착하기 어렵다. 따라서 현실적인 교통류 패턴을 고려하기 위해서는 $\Phi^{ij}(t_{dp}, t_{ar})$ 를 이용해야 한다. GLS 함수 (9)의 $\widehat{T}^{ij}(t_{ar})$ 에 대한 Gradient는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z}{\partial T^{rs}(t_{dp}')} &= \frac{\partial}{\partial T^{rs}(t_{dp}')} \sum_{ij \in OD_{t_n} \in T} \left\{ \sum_{t_{dp} \in T} T^{ij}(t_{dp}) \cdot \Phi^{ij}(t_{dp}, t_{ar}) - \overline{T}^{ij}(t_{ar}) \right\}^2 \\ &= 2 \cdot \sum_{ij \in OD_{t_n} \in T} \sum_{t_{dp} \in T} \left\{ \left[\sum_{t_{dp} \in T} T^{ij}(t_{dp}) \cdot \Phi^{ij}(t_{dp}, t_{ar}) - \overline{T}^{ij}(t_{ar}) \right] \cdot \Phi^{rs}(t_{dp}', t_{ar}) \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

위의 Gradient를 $\nabla^{rs}(t_{dp}')$ 라 정의하자.

$$\nabla^{rs}(t_{dp}') = 2 \cdot \sum_{ij \in OD_{t_n} \in T} \sum_{t_{dp} \in T} \left\{ \left[\widehat{T}^{ij}(t_{ar}) - \overline{T}^{ij}(t_{ar}) \right] \cdot \Phi^{rs}(t_{dp}', t_{ar}) \right\} \quad (12)$$

식(9)를 최소화시키는 $T^{ij}(t_{ar})$ 의 최적해를 찾는 방법은 Spiess(1990)의 Gradient method를 이용한 것이다. 이 기법은 원래 링크 관측교통량을 이용한 정적 OD 추정모형을 위해 개발된 것이다. 이 갱신과정은 $\overline{T}^{ij}(t_{ar})$ 가 주어졌을 때, $T^{ij}(t_{ar})$ 를 재현하는 과정과 매우 유사하다. 하지만, OD 추정문제와는 달리 기종점간의 총 기종점 통행량은 보존되어야 한다. 이를 위해 식(13)을 추가한다.

$$\sum_{t_{dp} \in T} T^{ij}(t_{dp}) = \sum_{t_{ar} \in T} T^{ij}(t_{ar}) = T^{ij} \quad (13)$$

제약식(13) 아래에서의 최적 $T^{ij}(t_{dp})$ 를 찾기위해, 새로운 해도출 알고리즘을 개발하였다. 새로운 알고리즘은 Convex-combination method를 변형한 것이다. $T^{ij}(t_{dp})$ 는 식(14)를 이용해 반복적으로 갱신된다.

$$T_{n+1}^{ij}(t_{dp}) = T_n^{ij}(t_{dp}) + \lambda \cdot \{ D_n^{ij}(t_{dp}) - T_n^{ij}(t_{dp}) \} \quad (14)$$

여기서,

$$\begin{aligned} D_n^{ij}(t_{dp}) &= T_n^{ij}(t_{dp}) + \lambda \cdot \frac{\nabla^{ij}(t_{dp})}{\sum_{t_{dp} \in T} \nabla^{ij}(t_{dp}')}, \\ \text{if } \nabla_n^{rs}(t_{dp}) \leq 0, & \quad D_n^{ij}(t_{dp}) = 0, \\ \text{Otherwise } (\nabla_n^{rs}(t_{dp}) > 0) & \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} F_n^{ij} &= \sum_{t_{dp} \in T} T_n^{ij}(t_{dp}'), \quad \text{where } t_{dp}' \in T \\ \text{if } \nabla^{rs}(t_{dp}') > 0 & \end{aligned} \quad (16)$$

식(14)에서 λ 의 최적값은 Golden section method와 같은 일반적인 구간 감소(Interval reduction) 기법을 이용해 찾을 수 있다. 식(10)과 식(14)를 식(9)에 대입하면 새로운 목적함수를 식(17)과 같이 구할 수 있다.

$$Z = \text{Min} \sum_{ij \in OD_{t_n} \in T} \left\langle \sum_{t_{dp} \in T} \left[T^{ij}(t_{dp}) + \lambda \cdot \{ D^{ij}(t_{dp}) - T^{ij}(t_{dp}) \} \right] \cdot \Phi^{ij}(t_{dp}, t_{ar}) - \overline{T}^{ij}(t_{ar}) \right\rangle^2 \quad (17)$$

GLS 기법의 문제는 만약 특정한 시간대에 출발 교통량이 없다면, $\nabla^{ij}(\cdot)$ 은 계산이 불가능하다. 따라서 정확한 해를 계산하기 위해서는 초기해에서 모든 실행 가능한 출발 시간대들이 0이 아닌 값을 가져야한다. 모든 출발시간대에 대해 신뢰 가능한 기종점 통행시간 분포를 얻기 위해서는 모든 시간대에 대해 충분히 큰 임의의 값을 설정하는 것이 반복계산의 첫 단계에 출발시간 기반의 OD 통행량을 계산하는 한 가지 방법이 될 수 있다.

3. FIFO violation 기법

이전 장에서 설명한 것과 같이 도착시간 기반의 동적 통행배정 문제를 풀기 위해서는 두 가지의 독립적인 과정이 필요하다. 첫 번째 과정에서 모형은 최적의 경로 교통량 패턴과 출발시간을 현재의 교통망 통행패턴과 주어진 도착시간 기반 OD표를 이용해 얻을 수 있다. 그 다음에는 고정된 출발시간을 갖는 경로 교통량을 교통망에 부과하고, 시뮬레이션에 의한 도착 교통량 패턴과 주어진 도착시간 기준 OD 통행패턴간의 편차를 계산한다.

이때 발생한 편차를 감소시키는 방법 중 하나로 Feedback dynamic system을 이용할 수 있다. 동적 통행배정 문제에 동적 이론(Dynamic theory)을 적용한 연구는 Smith(1984)이다. 그는 단조성을 갖는 비용함수를 갖는 Route-swapping dynamic system의 모든 Trajectory는 Lyapunov method를 이용해 이용자 평형해에 수렴할 수 있다고 밝혔다. Peeta and Yang(2003) 역시 DTA를 위한 동적 시스템을 Lyapunov method를 이용해 개발하였다. 그들은 수학적으로 Smith(1984)의 주장이 만족됨을 보였고, 동적 시스템으로 구성된 DTA 문제의 안정성에 대해 연구하였다.

최근에 Jin(2007)은 동적 통행배정 문제에서 평형해를 찾기 위한 동적 시스템의 성질에 대해 연구하였다. 그는 그가 개발한 동적 시스템의 목적함수와 UE 조건간의 관계를 BMW formulation을 통해 나타내었다. 임용택 등(2006)은 이 기법을 가변수요를 고려한 통행배정 모형 구축에 적용하기도 하였다. Peeta and Yang(2003)과 같이 Jin(2007)은 BMW 목적함수를 통해 동적 시스템의 총 에너지를 나타내었으며, 이를 'FIFO violation function'이라고 명명하였다. 이때, 함수의 최소 에너지는 이용자 평형상태에서 찾아진다. FIFO violation function은 식(18)과 같다.

$$J_k^{ij} = T^{ij} \cdot f_k^{ij} \cdot (c_k^{ij} - \nu_{ij}) \tag{18}$$

식(18)은 부하된 교통량이 FIFO(First-in-first-out) 조건식을 얼마나 위배하는지를 계측한다. 동적 이용자 평형상태에서는 같은 기종점 사이에서 동일한 시간대에 출발한 모든 차량들은 동일한 시간대에 도착해야 한다. 또, 어떠한 통행자도 일방적으로 그들의 출발시간이나 경로를 바꾸어 통행시간을 단축할 수 없다. Jin(2007)은 이러한 조건이 만족되는 수준이 FIFO 규칙에 의해 계량화 될 수 있음을 밝혔다. 경로 통행시간이 계산 가능한 경우 ij 간의 평균 통행시간 ν_{ij} 는 식(19)와 같이 계산 가능하다.

$$\nu_{ij} = \frac{\sum_{k \in K} f_k^{ij} \cdot c_k^{ij}}{T^{ij}} \tag{19}$$

이 경우, FIFO 위배의 목적함수는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$J_k^{ij} = f_k^{ij} \cdot (T^{ij} \cdot c_k^{ij} - \sum_{p \in P} f_p^{ij} \cdot c_p^{ij}) = f_k^{ij} \cdot \sum_{p \in P} f_p^{ij} \cdot (c_k^{ij} - c_p^{ij}) \tag{20}$$

경로교통량 f_k^{ij} 가 최적점에 도달하면 식(18)의 함수 값은 0에 접근한다. 이에 대한 증명은 Jin(2007)을 참고하기 바란다. 그는 해당 최적 경로교통량이 반복적인 갱신을 통해 찾아질 수 있으며, 그 갱신은 식(21)에 의해 가능하다고 밝혔다.

$$\hat{f}_k^{ij} = \frac{f_k^{ij}(\tau + \Delta\tau) - f_k^{ij}(\tau)}{\Delta\tau} = -J_k^{ij} \tag{21}$$

$\Delta\tau$ 는 0.01과 같이 매우 작은 값을 이용하며, 초기값으로는 0을 쓸 수 있다. 그렇지 않은 경우에는 경로교통량의 변화 크기로서 $-J_k^{ij}$ 값을 직접 쓸 수 있다고도 밝혔다. 만약, 일반적인 Column generation 기법이 FIFO violation function의 경로교통량 갱신기법과 결합될 경우, 최적의 경로교통량 값이 직접 찾아질 수도 있다.

도착시간 기준 DUE 문제에 대한 FIFO violation function $J_k^{ij}(t_{ar})$ 은 식(22)와 같이 구성이 가능하다.

$$J_k^{ij}(t_{ar}) = \hat{f}_k^{ij}(t_{ar}) \cdot \sum_{p \in P} \hat{f}_p^{ij}(t_{ar}) \cdot \{\hat{c}_k^{ij}(t_{ar}) - \hat{c}_p^{ij}(t_{ar})\} \tag{22}$$

식(21)로부터,

$$\begin{aligned}
 \widehat{f}_k^{i,j,n+1}(t_{ar}) &= \widehat{f}_k^{i,j}(t_{ar}) - \Delta\tau \cdot J_k^{i,j,n} \\
 &= \widehat{f}_k^{i,j,n}(t_{ar}) - \Delta\tau \cdot \left[\widehat{f}_k^{i,j,n}(t_{ar}) \cdot \sum_{p \in P} \widehat{f}_p^{i,j,n}(t_{ar}) \right] \\
 &\quad \cdot \left\{ \widehat{c}_k^{i,j,n}(t_{ar}) - \widehat{c}_p^{i,j,n}(t_{ar}) \right\} \\
 &= \widehat{f}_k^{i,j,n}(t_{ar}) \cdot \left[1 - \Delta\tau \cdot \sum_{p \in P} \widehat{f}_p^{i,j,n}(t_{ar}) \right] \\
 &\quad \cdot \left\{ \widehat{c}_k^{i,j,n}(t_{ar}) - \widehat{c}_p^{i,j,n}(t_{ar}) \right\}
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

주의할 점은 식(23)에 의해 계산된 새로운 도착시간 기반의 교통량은 DUE 모형에 직접 적용될 수는 없다는 점이다.

이 교통량은 출발시간 기준의 교통량인 $\widehat{f}_k^{i,j,n+1}(t_{ar} - \widehat{c}_k^{i,j,n}(t_{ar}))$ 으로 변환된 뒤 교통망에 부과되어야 한다. 이러한 갱신과정은 모든 경로에 대한 J 함수값이 모든 시간대에 대하여 0이 될 때 중지된다. Jin(2007)이 주장한 바와 같이 $\Delta\tau$ 는 매우 작은 값으로 설정될 경우 최적해 도달을 보장할 수 있다. 그러나 $\Delta\tau$ 의 값이 작아질수록 계산효율은 나빠진다. 최적해 탐색 가능성과 계산효율을 동시에 최적화하기 위해서는 더 나은 해도출 기법 개발이 필요하다.

FIFO violation 함수에서 마지막으로 강조할 점은 기종점 통행시간의 계산이다. VI 함수를 이용하는 경우 평형상태에서 모든 경로의 통행시간은 같아지므로, 기종점 통행시간은 유일 값으로 결정된다. 하지만, 링크에 유출용량 제약이 존재하는 경우 이러한 가설은 성립될 수 없다. 동일한 시간에 동일한 기종점을 동일한 경로를 이용해 출발한 차량도 서로 다른 통행시간을 경험할 수 있다. GLS 목적함수를 이용하는 경우 경로 통행시간은 확률분포로 가정되며, 이는 현실에 보다 가까운 가정이라 할 수 있다. 하지만, 이 경우에는 서로 다른 OD 쌍이나 출발시간 간에 출발 교통량을 교환해도 도착 교통류 패턴이 동일한 상황

이 더 자주 발생할 수 있다. 이는 GLS 기법이 동일한 도착 시간 기준 OD 통행패턴에 대해 더 많은 복수의 출발 교통량 패턴 해를 가질 수 있음을 시사한다. FIFO violation 기법 역시 평형 기종점 통행시간이 유일한 값이 아니라는 가정을 수용하지만, FIFO violation 기법은 GLS 기법에 비해 그 갱신과정이 간단하고 보다 평형이론 및 동적시스템 이론에 기반한다는 장점을 갖고 있다. 따라서 이 기법은 GLS의 현실성과 VI 함수의 이론적 장점을 동시에 포함하는 방법이다. 다만, 통행배정 단계에서 경로 교통량을 외생적으로 결정해 고정시킬 수 없는 경우에는 적용이 어렵다는 단점을 가지고 있다.

IV. 계산 결과

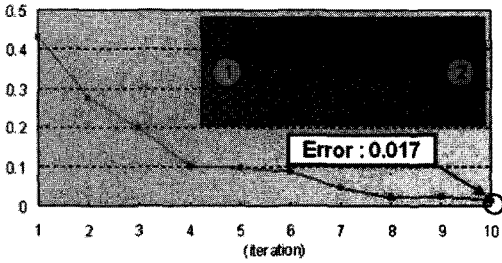
1. 예제 교통망 1

본 연구에서는 3장에서 제시한 세 기법 중 GLS를 이용한 방법을 실제 교통망에서 실험하였다. 세 기법 중 FIFO violation 함수를 이용한 방법도 알고리즘 특성이 우수하지만, 통행배정 과정을 위해 본 연구에서는 상용 패키지인 DYNASMART-P (Mahmassani 등, 2004)를 이용하기 때문에 경로 교통량을 외부에서 조절하기가 어렵다. 따라서 GLS방법을 이용자 평형 규칙과 함께 적용한 뒤, 확률적으로 기종점 통행시간을 시뮬레이션에서 얻어 출발 기종점 통행패턴을 반복 갱신하였다.

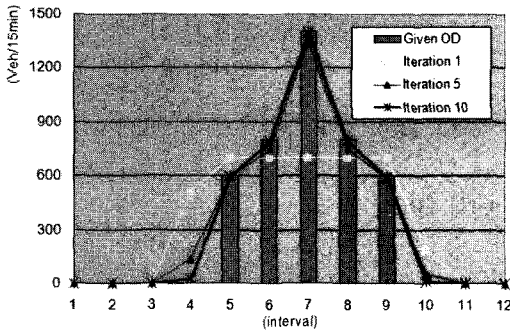
<그림 4>에 예제 교통망 1과 모형의 수렴행태를 제시하였다. 예제 교통망 1은 1개의 기종점만을 가진 교통망으로서 두 개의 경로로 연결되어 있다. 두 경로는 모두 단일 링크로 구성되어 있으며 링크 길이와 용량, 설계속도는 18.29 km, 3,600(대/시), 96.56(km/시)로 동

<표 1> 수학적 구성식 장·단점 비교

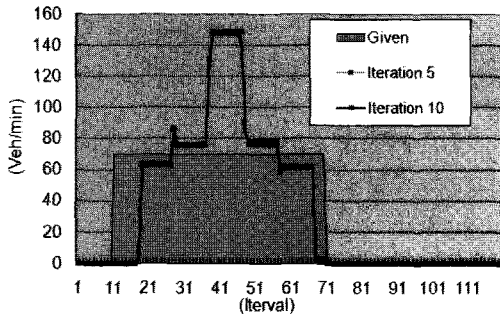
구성식	장점	단점
VI	1) 수학적 성질이 많은 연구를 통해 알려짐 2) 수학적 평형개념에 기반함 3) 다양한 해도출 알고리즘이 존재함	1) 링크 유출용량에 제한이 있거나, 교통류가 분산되는 경우 적용 불가능 함
GLS	1) 링크 유출용량이 제한되거나, 교통류가 분산되더라도 적용 가능함 (통행시간을 분포로 고려 가능) 2) 다양한 해도출 알고리즘이 존재함	1) 출발교통량이 없으면 경로의 경우 Gradient 계산이 불가능 함
FIFO violation	1) VI와 GLS기법의 장점을 공유함 2) 해도출 알고리즘이 단순함 3) 평형이론과 동적이론에 기반을 두므로 수학적 성질이 우수함	1) 최근에 개발되었기 때문에 적용예가 적음 2) 해도출 알고리즘 내 이동크기 계산이 경험 기법에 의존함 3) 경로교통량이 통행배정시 외생적으로 계산되어 고정되어야 함



〈그림 4〉 수렴성과 예제 교통망 1



〈그림 5〉 희망도착 OD 통행량 분포와 시뮬레이션 결과 (교통망 1)



〈그림 6〉 희망 도착분포를 만족하는 기중점 통행량 출발 패턴(교통망 1)

일하였다. 기점 1에서 종점 2로의 총 도착교통량은 4,200 대로 가정하였으며, 주어진 희망도착 교통패턴에 따라 각 출발 시간대 별 교통량은 GLS 기법을 통해 계산되었다. GLS를 이용한 모형은 반복계산 10회 만에 충분한 수렴을 기록하였으며, 이때 주어진 희망 도착 기중점 통행패턴과 계산된 패턴간의 상대오차 (Relative Mean Square Error)는 0.017이었다.

〈그림 5〉에서는 OD 1→2 사이의 도착시간 기준 OD 통행분포와 반복계산에 따른 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 반복계산 1회 이후에는 희망도착분포와 실제 도착

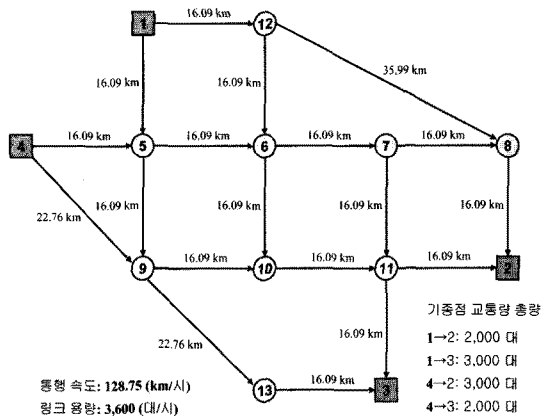
분포간의 차이가 명확하게 존재하지만 10회의 반복계산 이후에는 그 편차가 무시할 수 있을 정도로 작아진다는 사실을 확인할 수 있다. 이때, 희망도착 통행분포를 정의한 도착시간 간격의 길이는 15분으로 설정하였다.

〈그림 6〉에서는 주어진 도착 교통량 패턴을 만족하는, 알고리즘을 통해 계산된 출발 교통량 패턴을 제시하였다. 이때, 출발교통량은 각 1분 시간간격에 대해 계산되는 것으로 가정하였다. 초기 출발패턴은 Uniform으로 가정하고 출발 통행량이 존재하는 시간길이는 1시간이라 가정하였다. 계산 결과에서 보는 것처럼, 최적 출발 교통량 패턴은 50여분 동안 존재하는 것으로 나타났으며, 최초출발이후 약 20분정도 경과 후 첨두가 나타나는 것으로 계산되었다.

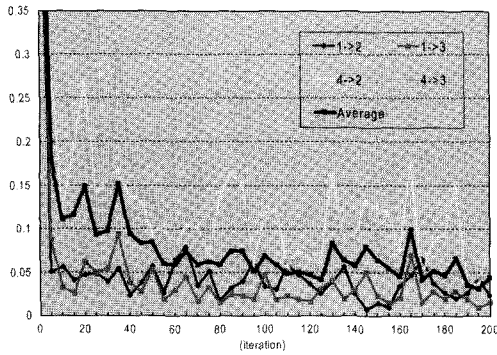
2. 예제 교통망 2

모형을 좀 더 일반적인 상황에서 실험하기 위해 〈그림 7〉에 보는 것과 같은 예제교통망 2를 이용하였다. 링크 길이는 링크 상단 또는 옆에 표시하였고, 모든 링크의 용량과 통행 속도는 각각 3,600(대/시)와 128.75(km/시)로 동일하게 설정하였다. 교통망내의 노드 중 기중점은 노드 1, 2, 3, 4인 것으로 가정하였다. 통행배정은 Test 1과 마찬가지로 DYNASMART-P를 UE option과 함께 이용하였다. 도착시간 기준 OD의 경우 〈그림 9〉에 막대그래프를 통해 제시하였으며, 차량의 출발 교통량 부하 시간 간격은 1분으로 설정하였다.

모형은 반복계산 195회 이후 상대오차 0.03 이내로 진입하여 수렴하였다. 〈그림 8〉에 도해한 바와 같이 일정 수준의 진동이 존재하였으나 꾸준히 평균적인 오차는



〈그림 7〉 예제 교통망 2



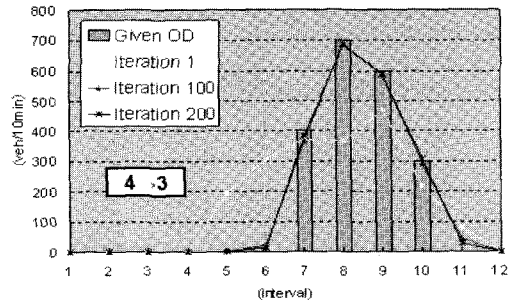
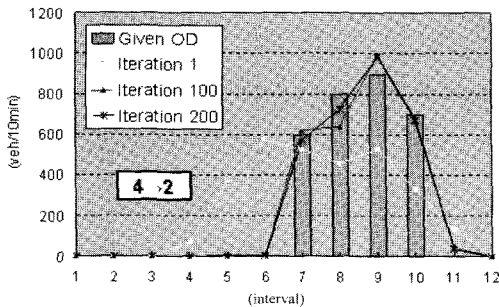
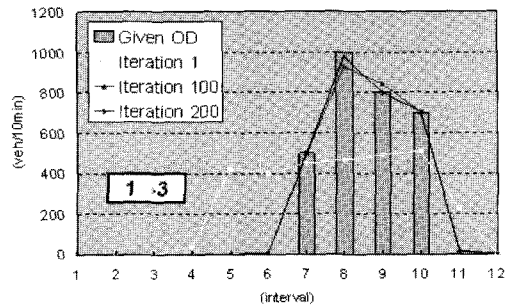
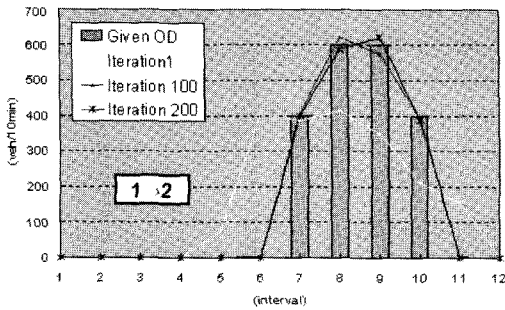
〈그림 8〉 예제 교통망 2에서 모형의 수렴

줄어드는 행태를 보여주었다. 이러한 진동의 존재는 이전 계산횟수의 통행시간을 기반으로 갱신된 출발패턴이 만족스러운 도착패턴을 재현하지 못했음을 의미하는 것으로, 통행시간이 각 반복계산마다 불안정하게 변화할 때 나타나게 된다. 이는 여러 가지 요인이 있을 수 있으나, 그 중 한 가지 원인으로 통행배정 과정에서 경로교통량의 제어가 외생적으로 불가능하다는 점도 고려할 수 있다. 즉, 상위모형에서 경로교통량의 크기를 직접 지정한다면 상대적으로 통행패턴의 변화를 줄일 수도 있다. 이러한 경우 보다 안정적인 수렴 행태가 나타날 것이다. 또 다른 문제는 DYNAMSMART-P 자체가 주어진 OD값을 발생확률로 변환해 차량을 발생시키는 Random

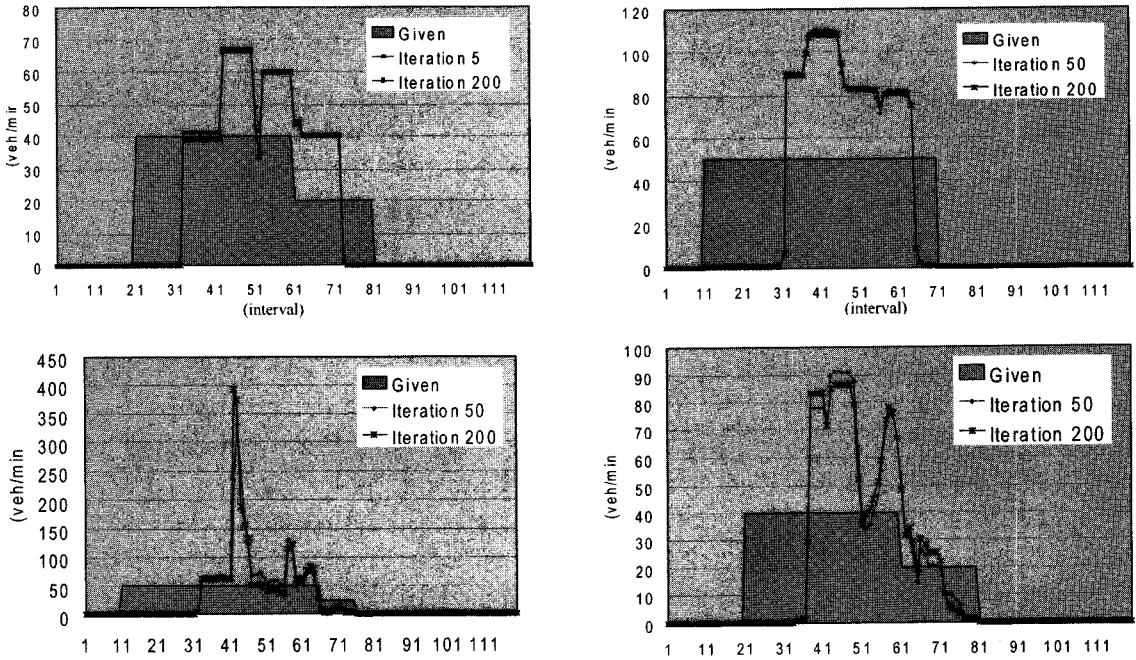
process를 가지고 있다는 점이다. 이 역시 수렴 변동의 원인이 된다.

〈그림 9〉는 도착 기종점 교통량 패턴의 변화를 보여준다. 모든 기종점들에 대해 개발된 알고리즘은 높은 수준의 일치를 보여주고 있다. 다만, 일부 희망도착 통행량 분포가 존재하는 직전 시간대와 직후 시간대 도착 교통량이 완전히 사라지지 않았는데, 이는 출발 통행량의 분산 때문에 완전히 소거되기는 어려울 것으로 판단된다.

〈그림 10〉은 각 기종점별로 희망도착분포와 일치하는 도착 교통량 분포를 발생시킨 출발패턴을 보여준다. 임의로 한 기종점 쌍은 완전히 Uniform한 초기 출발패턴을, 나머지 세 기종점 쌍은 전체 시간대를 두 구간으로 나누어 Uniform한 발생패턴을 설정하였다. 최종결과에서 볼 수 있듯 초기 패턴이 최종해에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 판단된다. 다만, 모든 출발패턴에서 여러 개의 첨두들이 나타났는데, 이 패턴은 수학적으로 도착패턴을 발생시키는 여러 개의 패턴 중 하나일 뿐이므로 실제 통행자들이 이러한 추정패턴과 동일한 패턴을 가질 것인지는 알 수 없다. 따라서 그 가능성을 최대화하기 위해서는 통행자들의 통행 행태를 고려하고, 전체 통행패턴에 대한 제약을 미리 설정하거나 확률분포를 통해 출발 통행패턴의 형태를 미리 정해놓는 등의 방법을 통해 해의 존재가능 영역을 줄이는 노력이 병행되어야 할 것이다.



〈그림 9〉 희망도착 OD 통행량 분포와 시뮬레이션 결과(교통망 2)



〈그림 10〉 희망 도착분포를 만족하는 기종점 통행량 출발 패턴(교통망 2)

V. 결론

본 연구에서는 기존 출발시간 기준 기종점표를 이용하는 동적 통행배정 모형이 갖는 문제점에 대해 살펴보고, 이를 극복할 수 있는 도착시간 기준 기종점표를 이용한 동적 통행배정 모형을 개발하였다. 모형의 목적함수와 해도출 알고리즘으로 세 가지 방법을 제시하였으며, 그 중 변동부등식을 이용한 방법은 해석적인 동적 통행배정 모형을 위해 제시하였으나, 통행시간 함수의 변형과 기종점 통행시간의 정의가 갖는 한계 때문에 실제 적용성은 떨어지는 것으로 나타났다.

차량의 분산이 존재하더라도 출발 교통량 패턴을 찾을 수 있는 대안기법으로서 GLS 함수를 이용하는 방법과 Jin(2007)이 개발한 FIFO violation function을 이용한 방법을 수학적으로 제시하였으며, 이중 GLS 방법은 실제 알고리즘을 구축하여 두 종류의 예제 교통망에서 그 성능을 실험하였다. 실험결과 GLS 방법은 주어진 도착시간 기준 교통량 패턴을 재현할 수 있는 출발 교통량 패턴을 찾을 수 있는 것으로 판단된다. 단일 기종점이 있는 교통망뿐만 아니라 복수의 기종점들과 복수의 경로들이 존재하는 경우에도 만족스러운 수준의 수렴해를 찾을 수 있었다.

다만, GLS 기법에 의해 얻어진 출발 교통량 통행 패턴의 경우 그 패턴이 유일한 패턴이 아니다. 이는 문제의 수학적 성질을 고려할 때 다른 제약이 없다면 극복하기 어려운 문제인 것으로 판단된다. 즉, 정적인 통행배정 문제에서 링크 통행패턴은 유일하더라도 경로 교통량 조합은 무한히 존재하는 것과 같이, 주어진 도착패턴은 재현하더라도 그 패턴을 발생시킬 수 있는 출발패턴은 무한하게 존재할 수 있기 때문이다.

따라서 이 기법이 실제에 적용되기 위해서는 출발패턴의 실행 가능해 존재영역을 줄일 수 있는 방법이 개발되어야 할 것이다. 예를 들어 통행자들의 출발시간 선택행태를 고려해 제약에 추가한다던가, 연속된 출발시간간격간의 상호관계에 대한 제약을 추가한다면, 보다 현실적인 출발 교통량 패턴을 얻을 수 있을 것이다. 또, 향후 연구로서 본 연구에서는 개발하지 않은 FIFO violation function을 이용한 알고리즘도 실제 교통망에 적용하여 그 성능을 확인하는 것이 바람직 할 것이다.

알림 : 본 논문은 The 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board, January , 2006, Washington, D.C.에서 발표한 프레젠테이션을 수정, 보완하여 작성된 것입니다.

참고문헌

1. 김지홍·이경순·김영호·이성모(2005), 교통수요 기반의 도착예정시간 산출 알고리즘 개발, 대한교통학회지, 제23권 제2호, 대한교통학회, pp.107~116.
2. 김현명·임용택·백승걸(2001), 시뮬레이션 부하 기법을 이용한 경로기반 동적통행배정모형의 개발, 대한교통학회지, 제19권 제3호, 대한교통학회, pp.101~113.
3. 변완희·최병국·김주현·송두석(2005), 지각패널 터와 변동요금에 의한 교통류 분석 연구, 대한교통학회지, 제23권 제6호, 대한교통학회, pp.71~80.
4. 송성주·이승환·이상수(2004), 미시적 시뮬레이터를 이용한 실시간 신호제어시스템(COSMOS) 평가 시뮬레이션 환경 개발, 대한교통학회지, 제22권 제2호, 대한교통학회, pp.95~102.
5. 임용택·김현명(2006), 동적과정을 이용한 가변수요 통행배정모형의 알고리즘 개발, 대한교통학회지, 제24권 제2호, 대한교통학회, pp.169~178.
6. 천승훈·노경현(2001), CA(Cellular Automata) 모형을 이용한 고속도로 돌발상황 영향 분석 교통 시뮬레이션 모형 개발, 대한교통학회지, 제19권 제6호, 대한교통학회, pp.219~227.
7. Shin S., Choi K., Y. T. Oh(2002), Rolling horizon implementation for real-time operation of dynamic traffic assignment model, 대한교통학회지, 제20권 제4호, 대한교통학회, pp.135~150.
8. H. K. Chen(1999), Dynamic travel choice model: A variational inequality approach, Springer, New York.
9. D. W. Hearn(1982), The gap function of a convex program, Operations Researches, Let. 1, pp.67~71.
10. Janson B. N.(1991), Dynamic traffic assignment for urban road networks, Transportation Research. 25B, pp.143~161.
11. Jayakrishnan R., Tsai W. K., A. Chen(1995), A dynamic traffic assignment model with traffic-flow relationships, Transportation Research 3C, pp.51~72.
12. W. L. Jin(2007), A dynamical system model of the traffic assignment problem, Transportation Research 41B, pp.32~48.
13. H. Kim(2008), New dynamic travel demand modeling methods in advanced data collecting environments, UC, Irvine Ph. D. Dissertation.
14. Kuwahara M., and T. Akamatsu(1997), Decomposition of the reactive dynamic assignments with queues for a many-to-many origin destination pattern, Transportation Research. 31B, pp.1~10.
15. Mahmassani H. S., Sbayti H., X. Zhou (2004), DYNASMART-P(version 1.0) user's guide, Maryland Transportation Institute.
16. Peeta S., T-H Yang(2003), Stability issues for dynamic traffic assignment, Automatica 39, pp.21~34.
17. Ran B., and D. E. Boyce(1996), Modeling dynamic transportation networks, Second revised edition, Springer, New York.
18. M. J. Smith(1984), The stability of a dynamic model of traffic assignment-An application of a method of Lyapuniv, Transportation Science Vol. 18, No. 3, pp.245~252.
19. H. Spiess(1990), A gradient approach for the O-D matrix adjustment problem, Transportation Research Paper #692, University of Montreal.

On-Line References
<http://www.paramics-online.com/>
 (2008)PARAMICS webpage, Quadstone.

✉ 주 작 성 자 : 김현명
 ✉ 교 신 저 자 : 김현명
 ✉ 논문투고일 : 2008. 6. 12
 ✉ 논문심사일 : 2009. 1. 9 (1차)
 2009. 1. 21 (2차)
 ✉ 심사판정일 : 2009. 1. 21
 ✉ 반론접수기한 : 2009. 6. 30
 ✉ 3인 익명 심사필
 ✉ 1인 abstract 교정필