

■ 論 文 ■

다계층을 고려한 대중교통 확률적사용자균형 알고리즘 개발

A Stochastic User Equilibrium Transit Assignment Algorithm for Multiple User Classes

유 순 경

(서울대학교 환경대학원 석사과정)

임 강 원

(서울대학교 환경대학원 교수)

이 영 인

(서울대학교 환경대학원 교수)

임 용 택

(여수대학교 교통물류시스템공학부 조교수)

목 차

- | | |
|--|---|
| <p>I. 서론</p> <p>1. 연구배경 및 목적</p> <p>2. 연구의 범위 및 방법</p> <p>II. 기존연구고찰</p> <p>1. 대중교통 통행배정모형</p> <p>2. 다계층 통행배정모형</p> <p>3. 확률적 통행배정모형</p> <p>4. 대중교통 경로탐색모형</p> | <p>III. 이론 및 알고리즘의 정립</p> <p>1. 모형의 기본전제</p> <p>2. 다계층 확률적사용자균형통행배정 알고리즘의 개발</p> <p>IV. 알고리즘의 검증</p> <p>1. 알고리즘의 검증</p> <p>V. 결론 및 향후연구</p> <p>참고문헌</p> |
|--|---|

Key Words : 대중교통 통행배정, 확률적 통행배정, 다계층 통행배정, 로짓확률, 대각화 알고리즘, 동등경로통행비용

요 약

본 논문은 기존에 제대로 다루지 못한 대중교통 통행자의 확률적 속성과 이질적 특성을 고려한 다계층 확률적 사용자균형 통행배정모형을 개발하는데 연구의 목적이 있다. 기존 대중교통 통행배정모형은 통행자의 특성이 모두 동일하다고 가정하기 때문에 현실적인 결과를 도출하는데 한계를 갖고 있다. 예를 들어 대중교통에 대한 정보를 제공받는 그룹과 그렇지 못한 그룹이 존재하는 경우, 이들 간에는 분명히 통행패턴에 차이가 있음에도 불구하고 이를 정확히 표현하는데 어려움이 있었다.

이러한 한계를 극복하기 위해 통행자의 확률적 속성과 이질적 특성을 반영한 알고리즘을 개발하였다. 통행자간 인지비용의 차이는 확률적 통행배정으로 구현되었으며, 그룹간의 이질성은 다계층 통행배정모형으로 구현하여 현실성 있는 대중교통 분석결과를 도출해 내도록 하였다. 모형구축에 있어 각 계층의 통행량에 영향을 받는 통행비용함수를 구축하였고, 기존 로짓모형의 단점으로 나타난 비관련대안의 독립성(IIA)문제를 해결하기 위해 C-로짓모형을 적용하였다. 연구결과 계층별/경로별로 배정통행량 및 동등경로통행시간에 뚜렷한 차이를 보이고 있으며, 확률적 사용자균형 상태에 이르렀다. 또한 수렴속도도 빠르게 나타났으며, 반복횟수가 증가함에 따라 확률적 사용자 균형에 좀 더 가까워지고 각 계층별/경로별로 수렴함을 확인 할 수 있었다.

본 연구의 알고리즘은 향후 통행목적별 OD자료와 대중교통 승객의 이질적 속성 파라미터를 다양하게 적용해 봄으로써 대중교통정책의 평가도구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

The object of this study is a development of a stochastic user equilibrium transit assignment algorithm for multiple user classes considering stochastic characteristics and heterogeneous attributes of passengers. The existing transit assignment algorithms have limits to attain realistic results because they assume a characteristic of passengers to be equal. Although one group with transit information and the other group without it have different trip patterns, the past studies could not explain the differences.

For overcoming the problems, we use following methods. First, we apply a stochastic transit assignment model to obtain the difference of the perceived travel cost between passengers and apply a multiple user class assignment model to obtain the heterogeneous quality of groups to get realistic results. Second, we assume that person trips have influence on the travel cost function in the development of model. Third, we use a C-logit model for solving IIA(independence of irrelevant alternatives) problems. According to repetition, assigned trips and equivalent path cost have difference by each group and each path. The result comes close to stochastic user equilibrium and converging speed is very fast.

The algorithm of this study is expected to make good use of evaluation tools in the transit policies by applying heterogeneous attributes and OD data.

1. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

대도시에서 교통혼잡이 가중되면서 교통문제를 해결하려는 노력이 점점 커지고 있으며, 많은 정책적인 대안이 나오고 있다. 교통문제는 도시의 지속가능한 발전을 저해하는 요인으로, 도시성장을 위해서 정부가 해결해야 할 큰 골칫거리이다. 이에 정부는 지능형교통체계(ITS) 구축에 많은 예산을 투자하고 있으며, 서울시는 대중교통우선 정책으로 지하철 확충 및 대중교통운영체계 개편을 통해 이를 개선시키기 위한 노력을 하고 있고, 점차 증가하는 통행량을 감당하기 위해서는 개별차량을 위한 정책 보다 대중교통우주의 정책이 필요하다. 그래서 세계는 2004년 7월 개편된 서울시의 대중교통 통합운영체제와 그 정책을 평가결과에 이목이 집중되고 있다.

최근의 대중교통에 관한 연구는 이러한 정책적 대안을 평가하기 위해 대중교통의 특성에 대한 연구 위주로 진행하고 있다. 그리고 대중교통 통행자의 특성을 동일하다고 보는 단일 통행자 계층으로 연구가 진행되고 있으며, 통행자의 다양한 특성을 나타내기 위해 확률적 통행배정방법을 사용한다. 그러나 지능형교통체계의 발달로 출발 전 정보제공을 받는 대중교통 이용자를 분석하는 경우나, 특정 이용자 집단을 대상으로 대중교통 정책을 실시할 경우 명백한 집단의 차이가 나타나기 때문에 사용자계층을 여러 기준으로 나누어 고려한 분석방법을 사용해야 한다. 그렇지 않을 경우 통행자의 이질적 특성을 고려한 결과는 특정 통행자 그룹을 대상으로 한 정책 분석 결과가 될 수 없다. Lam W.H.K.(1998b)이 연구하였지만, 통행배정방법 및 대중교통특성 등의 반영에 있어 연구가 부족하다.

따라서 본 논문에서는 기존 연구에서 제대로 다루지 못한 확률적 통행배정 방법 및 대중교통특성을 반영해, 통행자의 이질적 특성을 고려한 다계층 대중교통 통행배정모형에 대한 연구를 진행하고자 한다. 또한 통행배정시 통행자의 인지비용의 차이와 이질적 통행행태를 고려하기 위해 다계층 확률적 사용자균형 통행배정모형을 구축하여, 보다 현실성 있는 대중교통 분석결과를 도출해내는 모형을 제시해 보고자 한다.

2. 연구의 범위 및 방법

본 논문에서는 앞에서 살펴본 바와 같이 다음과 같

은 내용을 연구한다.

첫째, 네트워크 구축시 버스과 지하철만 고려한 대중교통망을 구축한다. 대중교통이 통합 운영되면서 앞으로 대중교통정책은 두 수단을 따로 고려해 분석할 수 없다. 따라서 통합교통망에서 분석이 이루어져야하기 때문에 환승을 고려할 수 있는 대중교통 통합교통망을 구성한다.

둘째, 수단별, 계층별로 비용함수가 다르게 구성하고, 각 계층별로 비용함수에 영향을 고려한 통행비용함수를 구성한다. De Cea J. and J. E. Fernandez(1993, 1996)가 제시한 식을 기본으로 통행비용이 자신의 통행량뿐 아니라 다른 계층의 통행량에도 영향을 받는 수정된 형태로 비대칭통행비용함수를 구축한다. 이때 버스, 지하철 수단 간에는 서로 영향을 미치지 않기 때문에 분리형태의 통행비용함수가 되고, 계층 간에는 통행시간에 영향을 받기 때문에 비분리형태의 통행비용함수가 된다.

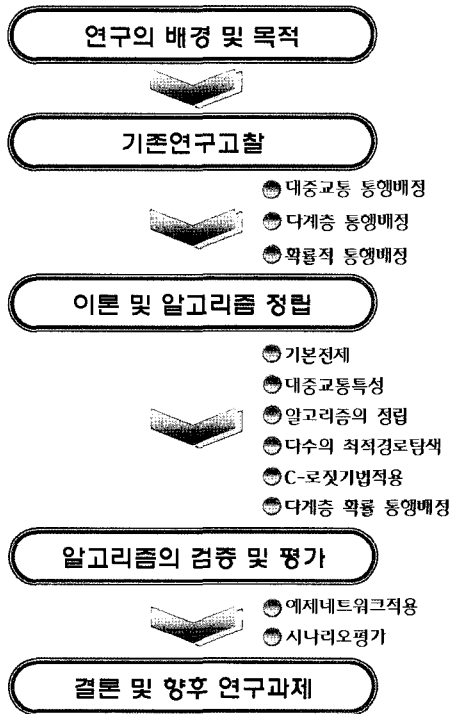
셋째, 다계층 통행배정문제를 풀기위해 대각화 알고리즘(Diagonalized algorithm 또는 Relaxation method)을 사용한다. 대각화 알고리즘은 Frank-Wolfe 알고리즘을 수정하여 상대적으로 쉽게 구현할 수 있다는 점에서 비대칭 통행배정모형의 해석 알고리즘으로 많이 사용된다. 부대각요소를 고정시키고 주대각요소만으로 변환시킨 분리형태의 함수로 Frank-Wolfe 알고리즘을 적용하여 해를 구하는 것이다.

넷째, 수단별, 계층별로 구축된 비용함수로 확률적 사용자 균형상태를 만들기 위한 모형을 구축한다. 과거 단일계층을 대상으로 분석을 할 때에는 통행자의 이질성을 고려하기 위해 확률적 통행배정방법을 사용하였다. 그러나 통행자의 특성이 뚜렷이 다른 경우 이를 계층별로 구분할 수 있고, 이렇게 적용해야 정확한 분석이 이루어진다. 따라서 본 연구에서는 계층적 차이를 고려하면서 계층내의 이질적 속성을 반영할 수 있도록, 계층별로 확률적 사용자 균형상태에 이르는 로짓 통행배정모형을 개발한다.

다섯째, 대중교통망에서 경로선택방법은 확률적 사용자균형 통행배정모형을 구축하기 위해 k-path 알고리즘을 이용해 다수의 대안경로를 선택한다. 선택된 다수의 대안경로를 통해 통행량이 배정되고, 통행배정 후에 각각의 경로통행비용은 확률적 오차를 가지며 인지 통행시간비용이 같아지게 된다.

여섯째, 로짓기반 확률적 통행배정 방법에서 나타나는 경로중복 문제를 해결할 수 있도록 C-로짓모형을

이용한다. 확률선택모형에서 다항로짓방법은 대안 경로의 중복성을 고려할 수 없기 때문에 선택확률이 비현실적인 경우가 생긴다. 따라서 대안 경로 간에 중복된 구간을 갖는 경우 노선간의 유사성을 추가적인 비용요소로 고려할 수 있는 C-로짓모형을 이용한다.



(그림 1) 연구수행 흐름도

II. 기존연구고찰

1. 대중교통 동행배정모형

현재 사용 중인 대중교통 동행배정모형은 크게 용량제약을 고려하지 않은 전량동행배정모형, 확률적 동행배정모형, 최적전략 동행배정모형들이 있으며, 용량제약을 고려한 균형 동행배정모형, 최적전략기반 균형 동행배정모형, 확률적 균형 동행배정모형 등이 있다. 대중교통에서 용량을 제약하지 않는 이유는 수요가 증가하면 대중교통의 배차간격을 줄여 용량을 무한히 증가시킬 수 있다는 가정에 기초한 것이었다. 그러나 이는 장기적인 관점에서 가능한 대안이며 단기적인 관점에서는 대중교통사용자도 혼잡을 겪을 수밖에 없다. 여기서 대중교통의 혼잡이란 개별차량의 혼잡개념과는 달리 차

량용량제약에 의한 차내 혼잡을 의미하는데 좀 더 현실적인 모형의 구성을 위해서는 대중교통의 혼잡을 고려한 용량제약이 필요하다.

용량 제약을 고려하지 않은 대중교통 동행배정모형 중 첫째, 전량 동행배정모형은 가장 기초적인 기법으로 대중교통 이용자가 출발지에서 목적지까지 최소 동행비용을 가지는 노선에 전량 배정되는 방법이다. 이는 기종점 동행량이 작고 경로의 수가 작을 때 적용 가능한 방법이며, 현실적이지 못한 단점이 있다. 둘째, 확률적 동행배정모형은 개별차량 동행배정모형과 마찬가지로 개별 동행자가 링크의 동행비용을 서로 다른 방식으로 인지한다는 인지비용의 차이를 전제로 기종점 경로 또는 링크의 사용 확률을 구하여 동행배정하는 방법이다. 주로 미리 정해진 링크동행비용 분포로부터 동행비용의 오차분포로 경로의 사용확률을 구하는 방법이 있다. 셋째, 최적전략 동행배정모형은 Spiess-Florian(1989)에 의해 제안된 모형으로 출발지에서 목적지까지 도달하기 위해 최선전략(Optimal Strategy)라는 개념을 사용하여 동행비용을 최소화시키는 기법이다.

용량제약을 고려하지 않은 모형의 경우 현실성이 떨어지기 때문에 최근에는 용량제약을 고려한 모형에 관한 연구가 주를 이룬다. 대중교통의 용량제약을 고려한 연구가 최초로 Last-Leak(1976)에 의해 수행되었고, 대중교통 균형동행배정을 위해 개별차량 동행비용함수의 형태로 대중교통 동행비용함수를 제시한 연구가 De Cea-Fernandez(1993, 1996)에 의해 진행되었다. 이성모(1996)는 De Cea-Fernandez(1993, 1996)에서 사용한 형태와 같은 비용함수를 가지고 정류장지체를 고려해 균형동행배정모형에 관한 연구를 하였고, 김현명(1999)은 De Cea-Fernandez (1993, 1996)의 비용함수를 변형시켜 통합교통망에서 개별차량과 대중교통의 환승을 고려한 동행배정모형을 개발하였다.

또한 Spiess(1993)는 기존의 최적전략 개념을 기본으로 대중교통 균형동행배정을 하였는데, 대중교통의 동행비용이 동행량에 따라 증가하는 것은 차량 내부가 혼잡해짐에 따라 느끼는 불편함(Discomfort)이 증가하는 것으로 해석하고 이를 일반화 비용의 증가로 표현해 모형을 구축하였다.

한편 용량제약을 고려해 확률적 동행배정을 한 연구를 살펴보면, 기존의 개별차량에서 사용한 확률적 동행배정모형의 개념을 그대로 대중교통망에 적용하여 사용하는 모형이 대부분이며, 대중교통의 특성을 고려한 연구가 이

신해(2003), Lam W.H.K(1998a), Lam W.H.K (1998b), Nielsen O.A.(2000)에 의해 수행되었다. 이신해(2003)는 기존의 대중교통 통행배정모형이 대중교통의 특성을 정확히 반영하지 못하는 문제점을 해결하기 위해 유전자 알고리즘을 이용해 최적경로를 탐색해 로짓모형으로 네트워크 부하를 이용한 확률적 통행배정을 하였다. Lam W.H.K(1998a) 승객의 과부하로 인한 지체를 비용함수에 포함시켜 로짓 기반으로 확률적 균형통행배정을 수행하고 수학적으로 증명하였고, Lam W.H.K(1998b)은 위 논문을 다계층으로 발전시켜 연구하였다. 또한 Nielsen O.A.(2000)은 통행자의 효용함수를 다르게 고려해 대중교통에서 확률적으로 통행배정하는 방법을 연구하였다.

대중교통 통행배정모형에 대한 기존연구의 대부분은 대중교통의 특성을 반영하기 위한 연구가 주로 진행되었다. 특히 환승태와 용량제약을 중심으로 이를 모형에서 분석하기위해 여러 가지 방법을 사용하였고, 최근에는 첨단교통체계에 대한 관심이 높아지면서 출발시간 선택모형, 동적 대중교통 통행배정 등에 대한 연구도 일부 진행되고 있다. 그러나 대부분의 연구는 통행자의 행태를 반영하는데 한계점을 가지고 있다.

첫째, 대중교통의 용량제약을 반영하는데 있어서 대부분의 연구는 통행자의 완벽한 정보를 가정한다. 즉 대중교통 통행배정시 균형통행배정을 하는데 이는 통행자의 이질적인 특성을 고려하지 않는 결과를 도출하게 된다. 이에 용량제약을 고려하면서 확률적 통행배정을 수행하는 모형이 필요하다.

둘째, 통행자의 이질적 특성을 고려해 확률적 통행배정을 하는 대부분의 연구에서도 용량제약을 고려하지 않거나, 확률적 사용자균형 통행배정을 수행하지 않는다. 대부분의 대중교통 확률통행배정모형은 통행비용이 고정되어 있다고 가정해 통행량에 따른 혼잡을 고려하지 못한다. 단지 로짓모형이나 프로빗모형을 이용해 균형통행량을 구하지 않고 부하시키는 모형을 사용하고 있다. 그러나 본 연구에서는 계층별로 통행량 증가에 따라 통행시간이 증가하는 현상을 반영할 뿐만 아니라, 기존연구에서 고려하지 못한 다른 계층이 통행량에 영향을 받는 확률적 사용자균형 통행배정을 수행한다.

셋째, 로짓모형을 고려한 확률통행배정시 경로의 중복성을 고려하지 않고 통행배정을 한다. 경로의 중복성 고려는 확률통행배정에서 중요한 역할을 한다. 이는 로짓모형에서 나타나는 비관련대안의 독립성(IIA)문제

〈표 1〉 기존연구와 본 연구의 차이점

기존연구	용량 제약		사용 자계층		통행배정 형태		경로 중복성		비고
	고려	비고려	단일	다계층	결정적	확률적	고려	비고려	
Cea-Fernandez (1993)	○		○		○			○	
Wu. (1994)	○		○		○			○	
Jayakrishnan (1995)		○	○			○		○	최적전략 알고리즘
이성모 (1996)	○		○		○			○	
Nguyen (1998)		○	○			○		○	Dial 알고리즘
Lam (1998a)	○		○			○		○	
Lam (1998b)	○			○		○		○	- 로짓모형 - 다계층 통행량에 영향을 받지 않음
김현명 (1999)	○		○		○			○	
이재섭 (1999)		○	○			○		○	Dial 알고리즘
Nielsen (2000)	○		○			○	○		프로빗 모형
이신해 (2003)	○		○			○		○	로짓모형
본연구	○			○		○	○		- 로짓모형 - 다계층 통행량에 영향을 받음

발생하는 현상으로 용량제약을 고려하더라도 경로의 중복성이 해결되지 않으면 배정된 통행량의 현실성이 떨어진다.

이상에서 살펴봤듯이, 기존의 모형이 해결하지 못한 통행자의 이질적 특성 반영문제, 확률적 균형 통행배정 문제, 경로의 중복성 문제를 해결하기 위한 대안을 본 연구에서 제시하고자 한다. 〈표 1〉에 기존 대중교통 통행배정 연구와의 차이점을 정리한 내용이다.

2. 다계층 통행배정모형

다계층 통행배정(Multiple User Class, MUC)이란 교통망을 이용하는 통행자들이 동일한 특성을 갖지 않는 이질적인 계층으로 구성된 경우, 이들 통행수요를 교통망에 배정하는 문제를 의미한다. 다계층 통행배정이 처음 시작된 동기는 주로 트럭과 승용차간의 상호영향을 고려한 통행패턴을 얻기 위해서였다. 최초의 연구는 Dafermos (1972)였는데 다계층 통행배정에 대한

기본적인 이론을 제시하였다. 그 후 Vliet, et al. (1986)이 최소화문제로 다계층 통행배정모형을 구축하고 해석 알고리즘을 제안하였으며, Mahmassni, et al.(1988)은 복수차량간 통행배정문제를 수학적 모형으로 제시하였다.

다계층 통행배정에서 통행계층을 구분하는 기준은 크게 통행자의 통행특성을 기준으로 나누는 방법과 통행자의 이용수단특성을 기준으로 나누는 방법이 있다. 통행특성을 기준으로 나누는 경우는 네트워크에 대한 교통정보이용 유무에 따라 나누는 방법과 소득수준에 따라 나누는 방법, 제약통행자와 선택통행자로 나누는 방법 등이 있다. 만약 통행자들의 이용수단을 제약하는 경우와 그렇지 않은 경우로 나누어 모형을 구축한다면, 두 모형의 계산결과는 큰 차이가 나타날 수 있다.

통행자의 이용수단특성을 기반으로 통행자 계층을 구분하는 방법은 복수수단 통행자 통행배정모형이라 부른다. 복수수단 통행배정모형이 복수계층 통행배정문제와 가장 크게 다른점은 복수계층의 경우 통행비용함수의 링크교통량 변수를 계층별로 구분할 필요가 없는데 이는 통행자의 특성이 통행자들이 이용하는 차량의 운행특성에 영향을 미치지 않기 때문이다. 그러나 복수수단 통행배정문제에서 사용되는 링크통행비용함수의 경우 링크통행 비용함수 내에 하나 이상의 교통량변수가 포함된다.

본 연구에서는 대중교통 이용자 계층은 De Cea J. and J. E. Fernandez (1993, 1996)에서 사용한 비용함수를 기반으로 한다. 따라서 대중교통 통행량(person trip)이 통행시간에 영향을 주게 되므로, 버스, 지하철 모두 통행비용함수가 다른 사용자 계층이 서로 영향을 받게 된다. 이는 복수수단의 통행배정모형과 같이 링크통행 비용함수 내에 하나 이상의 교통량변수가 포함되는 경우와 같으므로, 복수수단 통행배정과 같은 풀이 알고리즘이 필요하다.

이상에서 살펴본 내용을 바탕으로 복수수단의 다계층통행배정 모형에 관한 내용을 살펴보면 아래와 같다.

복수수단 통행배정모형은 본질적으로 비대칭문제가기 때문에 목적함수의 Jacobian 행렬이 비대칭적인 형태를 갖는다. 비대칭 문제에서 통행배정모형이 아래 두가지 조건을 만족해야 유일해를 갖게 된다. (Sheffi, 1985)

- (1) 링크 통행시간의 링크 통행량에 단조증가함수이어야 한다.

$$\frac{\partial c_a(x_a, x_a)}{\partial x_a} > 0$$

- (2) 각 링크의 통행비용은 해당 링크의 교통량에 주로 의존적이어야 한다. 즉 통행비용함수의 Jacobian matrix의 주대각요소(diagonal elements)의 값이 부대각요소(off-diagonal elements)의 값보다 매우 커야한다.

$$\frac{\partial c_a(x_a, x_a)}{\partial x_a} \gg \frac{\partial c_{a'}(x_a, x_{a'})}{\partial x_a}$$

복수수단의 통행배정문제는 주로 대각화 알고리즘을 이용하여 해결하는데, 변동부등식으로 목적함수를 이용하여 구하는 방법과 모형 구축없이 알고리즘만으로 해를 구하는 방법이 있다. 먼저 다계층 통행배정의 균형조건을 살펴보면 다음과 같다.

$$\begin{cases} C_k^m(f_k^m) = C_{rs}^{m*} & \text{if } f_k^m > 0 \\ C_k^m(f_k^m) \geq C_{rs}^{m*} & \text{if } f_k^m = 0 \end{cases}$$

여기서,

C_k^m : 계층 m의 경로 k에 대한 통행비용

C_{rs}^{m*} : 계층 m의 기종점 rs에 대한 최소경로통행비용

f_k^m : 계층 m의 경로 k에 대한 통행량

위 다계층 균형조건을 변동부등식(Variational Inequality)으로 모형하면 다음과 같아진다.

$$c(x^*)(x - x^*) \geq 0$$

$$s.t. \sum_m \sum_k f_k^m = q_{rs} \quad \forall m, r, s$$

$$f_k^m \geq 0 \quad \forall k, m$$

$$x_a^m = \sum_k f_k^m \delta_{ak} \quad \forall a$$

여기서, x_a^m : 사용자계층 m의 링크 a 통행량

f_k^m : 사용자계층 m의 경로 k 통행량

q_{rs}^m : 사용자계층 m의 기종점 rs간 OD통행량

c_a^m : 사용자계층 m의 링크 a 통행비용

위 조건을 만족하면 다계층 균형조건을 만족하게 되는데, x^* 는 균형통행량이다. 다계층 통행배정문제는 각 사용자간의 상호 영향으로 통행비용의 Jacobian 행렬이 비대칭이 된다. 따라서 일반적인 동등 최소화문제의 해석법으로 주로 사용되는 Frank-Wolfe 기법으로 직접 풀 수 없어, 이완기법(Relaxation method)을 주로 사용한다. 이 방법은 통행량 부하시 해당 사용자계층의 통행량만을 변수로 고려하고 나머지 사용자계층의 통행량은 고정시켜 푸는 방법으로 대각화기법(Diagonalized algorithm)과 동일하다.

3. 확률적 통행배정모형

결정적 통행배정모형에서 가정하는 통행자의 교통상황에 대한 완벽한 인식은 비현실적인 가정이다. 실제 교통망을 이용하는 사용자들은 자신이 현재 사용하는 경로 또는 링크의 통행비용을 정확히 알 수 없기 때문에 결정적 모형의 이런 약점들을 보완하기 위해 제안된 기법이 확률적 사용자 균형(Stochastic User Equilibrium, SUE) 개념이다. 확률적 통행배정에서 각 사용자들은 자신의 통행비용이 최소화 되도록 자신들이 경로를 선택한다. 따라서 SUE상태에서는 어떤 사용자도 자신의 경로를 변경해 인지통행비용을 감소시키지 못하게 된다.

경로선택 확률은 개별행태모형(discrete choice model) 이론에서 사용하는 효용함수 가정을 통해 구성할 수 있다. 개별행태 모형이 경우 확정적 효용과 확률적 효용을 결합하여 대안의 효용을 결정하는데 그 기본형태는 다음과 같다.

$$U_k(a) = V_k(a) + \xi_k(a) \quad \forall k \in K$$

여기서, a : 효용의 속성변수들의 벡터

$V_k(a)$: a에 따른 대안 k의 확정적 효용

$\xi_k(a)$: 추가적인 확률 오차항

만약 효용을 기종점간의 통행비용만으로 한정하면 위 식은 다음과 같이 표현된다.

$$U_k^* = -\theta c_k^* + \epsilon_k^*$$

만약 ϵ_k^* 가 주어진다면 사용자의 특정대안의 선택확률을 구할 수 있는데 오차항의 분포가 독립적이며 동일

하게(Independently and Identically Distributed, IID) Gumbel 분포를 이룬다고 가정하면 다음과 같다.

$$f_k^* = T^* \frac{\exp[-\theta c_k^*]}{\sum_{w \in W} \exp[-\theta c_w^*]}$$

여기서, θ 는 경로선택시 사용자의 인지분산값을 나타내는 양의 파라미터로 이 값이 커질수록 확정적 통행배정에 가깝게 된다.

Sheffi(1985)는 SUE 통행패턴을 나타내는 수학적 동등 최적화 문제를 아래와 같이 제시하였다.

$$\min z = -\sum_{rs} q_{rs} S_{rs}[c^{rs}(x)] + \sum_a x_a t_a(x_a) - \sum_a \int_0^{x_a} t_a(w) dw$$

여기서, $S_{rs}[c^{rs}(x)]$ ($S_{rs} = E[\min_k \{C_k^{rs}\}]$)는 기대인지 통행비용함수(expected perceived travel cost function)이다.

본 연구에서는 로짓기반 확률적 사용자균형 통행배정모형이 사용되었다. 확률적 사용자 균형 상태는 어떠한 통행자도 일방적으로 경로를 변경하여 그의 인지통행시간을 감소시킬 수 없는 상태를 의미한다. 이때, 특정 경로의 선택확률은 주어진 기종점간에 고려대상이 되는 경로들 중에 해당경로의 인지통행비용이 가장 적을 확률과 동일하다.

Wardrop의 확률적 사용자균형조건을 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{cases} C_k^{rs} = C^{rs*} & \text{if } f_k^{rs} > 0 \\ C_k^{rs} \geq C^{rs*} & \text{if } f_k^{rs} = 0 \end{cases}$$

여기서, $C_k^{rs} = c_k^{rs} + \frac{1}{\theta} \ln(f_k^{rs})$ 를 확정적 균형모형과 비교하여 동등경로통행비용(Equivalent path cost)로 정의한다.

4. 대중교통 경로탐색모형

확률적 통행배정모형을 적용하기 위해서는 대안경로와 그 수를 결정하는 것이 가장 중요한 역할을 한다. 특히 대중교통망에서는 여러 가지 제약조건들을 가지기

때문에 합리적인 경로를 탐색하는데 문제가 있다. 기존에 대중교통경로탐색에 유전자 알고리즘을 적용해 대중교통의 특성을 좀 더 정확히 반영한 대중교통 통행배정 모형에 관한 연구가 이신해(2003)에 의해 수행되었으나, 주로 경로 통행시간에 의존적으로 경로를 탐색할 뿐 경로의 중복성을 고려할 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 k-path 알고리즘을 이용하여 합리적인 다수의 최적경로를 탐색해 통행배정하는 방법을 사용하고자 한다. 이때 경로의 중복성을 고려하기 위해 C-로짓모형을 적용한다. 이를 본 모형에 적용하기 위해 Yen(1971)의 알고리즘을 살펴보고 대중교통의 특성을 고려해 구성해보고자 한다.

Yen(1971) 알고리즘의 기본개념은 최단경로가 탐색되면 경로 상에서 이 최단경로를 제외하고 가장 비용이 낮은 경로를 탐색하면서 두 번째, 세 번째 등 비용이 낮은 경로들을 결정하는 방법이다. 즉 A^1 이 결정되면 두 번째로 비용이 낮은 경로 A^2 는 A^1 과 대부분의 경로를 공유하게 되기 때문에, 최단경로에 포함된 경로들 중 일부의 노드를 A^1 에 속하지 않는 노드들로 대체하여 여러 개의 경로를 발생시켜 충분한 수가 발생되면 이들의 비용을 비교해서 A^2, A^3, \dots 등 K개의 최단경로를 구하는 방법이다.

또한 대안경로 선택 후 통행배정시 확률선택모형에서 방향로짓방법은 대안 노선의 중복성을 고려할 수 없어 선택확률이 비현실적인 경우가 생기기 때문에 대안 노선간에 중복된 구간을 갖는 경우 노선간의 유사성을 추가적인 비용요소로 고려할 수 있도록 C-로짓모형을 적용해야 링크 선택확률이 현실적으로 계산된다. C-로짓모형은 Cascetta E. et al(1996)에 의해 제안방법으로, 모형에서 사용되는 CF_k 는 경로 k의 공통성 계수(Commonality Facto)라고 부른다. 이것은 다른 모든 이용 가능한 경로에 있어서 경로 k의 중복부분에 대한 정도를 직접적으로 비율화한 것이다. 중복이 심한 노선은 큰 수의 공통성계수를 가질 것이고 이때 체계적인 효용은 작아질 것이다. 하지만 독립된 노선에 대해서는 이러한 현상이 발생하지 않을 것이다. 본 연구에서는 조용학(1999)이 제안한 알고리즘을 적용하고자 한다.

III. 이론 및 알고리즘 정립

1. 모형의 기본전제

본 연구에서 개발한 통행배정 알고리즘은 버스와 지

하철을 고려한 대중교통 네트워크에서 환승을 고려하여 수단선택과 통행배정을 실시하며, 통행배정은 통행비용 함수가 다른 계층이 확률적으로 사용자 균형 상태에 이르는 과정을 모형화 한 것으로 다음과 같은 전제를 포함한다.

첫째, 본 모형에서 다계층은 별도의 계층으로 구분된 통행자 그룹을 의미한다. 교통계획에서 다계층의 의미는 크게 두 가지로, 통행특성이 다른 통행자 계층을 의미하거나 통행수단이 다른 통행자 계층을 의미한다. 본 모형에서는 통행특성이 다른 통행자계층이라는 의미에서 다계층을 적용하며, 통행특성에 따른 통행자 그룹을 나누어 분석해 준다.

둘째, 통행은 출발시간의 차이 없이 동시에 일어나는 것으로 간주한다. 통행자의 출발시간에 따라서 통행량의 변화가 나타나기는 하지만, 본 모형에서는 외부에서 주어지는 것으로 보고 고려하지 않는다.

셋째, 개별차량과의 관계는 고려하지 않는다. 즉, 대중교통의 통행시간은 개별차량의 영향을 받지 않는다고 가정한다. 실제 지하철 네트워크는 독립적으로 볼 수 있지만, 버스네트워크는 개별차량과 같은 가로망을 이용하기 때문에 어느 정도 영향을 받는다. 그러나 대부분의 통행은 대중교통망과 승용차교통망에서 각각 통행배정이 이루어지기 때문에 승용차의 영향을 배제한다.

넷째, 각 경로구간의 통행시간은 정류장의 승하차행태와 배차간격 등으로 인하여 차이가 발생한다. 각 계층별 통행시간의 차이를 통행비용함수에 적용하더라도 차내 통행시간은 계층별로 같고, 환승이나 대기시간에 따라 다르게 나타나기 때문에 이와 같은 현상이 발생한다.

다섯째, 통행자는 자신의 효용을 극대화하는 경로를 선택하고, 각 계층별로 경로를 바꾸어도 인지통행시간 비용의 차이가 발생하지 않는 확률적 사용자균형상태가 된다. 이는 확률적 균형통행배정의 개념으로 본 모형에서도 계층별 차이만 나타날 뿐 계층내의 경로별 인지통행시간비용의 차이는 나타나지 않는다. 즉 통행비용의 차이만 나타나고 인지비용은 같아지게 된다.

여섯째, 통행량 증가에 따라 발생하는 차내 혼잡을 통행시간 측면에서 반영하였기 때문에 통행량이 증가함에 따라 통행시간이 점차 증가하는 것으로 반영하였다. 즉, 통행비용이 통행량에 따라 증가하는 것은 차량 내부가 혼잡해짐에 따라 느끼는 불편함이 증가하는 것으로 해석하고 이를 통행량이 증가함에 따라 일반화 비용

이 증가하는 것으로 표현해 모형을 구축하였다.

일곱째, 버스수단에서 지하철수단 또는 지하철수단에서 버스수단으로 환승은 모두 가능하며, 상수로 적용한다. 이때 환승비용은 전환하는 수단에 따라 같은 값을 가지며, 통행자 계층별로 다른 값을 가진다. 이는 계층별 통행시간의 차이가 대기시간과 환승시간에 따라 달라지도록 모형에 적용하는 것으로 본 연구에서는 적절한 값을 가정하였다.

2. 다계층 확률적사용자균형 통행배정 알고리즘의 개발

기존의 대중교통 통행배정모형에서 통행자의 특성이 동일하다고 보는 통행배정방법에 문제가 있어, 정확한 결과를 도출하지 못하고 있다. 예를 들어 대중교통정보 제공 유무를 고려한 OD통행량이나 통행목적별 OD통행량 및 연령과 기타 통행자 특성을 고려한 자료가 주어졌을 때 기존의 방법으로는 이를 분석할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 기존에 제대로 다루지 못한 확률적 통행배정 방법 및 대중교통특성을 반영해, 통행자의 이질적 특성을 고려한 다계층 대중교통 통행배정모형에 대한 연구를 진행한다. 또한 통행배정시 통행자의 인지비용의 차이와 이질적 통행행태를 고려하기 위해 다계층 확률적 사용자균형 통행배정모형을 구축하여 현실성 있는 대중교통 분석결과를 도출해내는 모형을 개발하였다.

기존의 다계층 통행배정모형은 사용자 균형상태를 가정한 모형으로 확률적 사용자 균형상태를 만들기 위해 통행배정모형을 개발하였다. 로짓 통행배정모형은 사용자의 균형상태를 보장하는 수리적인 모형식을 사용하지만 대부분 알고리즘의 모형식은 목적함수를 사용하지 않고 휴리스틱하게 수렴해를 찾는다. 본 연구에서는 계산과정이 오래 걸리지만, 적용이 쉬운 직접 로짓배정법으로 통행배정을 한다. 또한 다계층 통행배정문제의 경우 통행비용함수의 Jacobian matrix가 비대칭(asymmetric) 형태를 가지기 때문에 다수의 해를 가질 수 있다. 그러나 본 연구의 통행비용함수는 Sheffi(1985)가 제시한 조건을 만족시키기 때문에 유일해가 보장된다. 앞의 내용을 바탕으로 대중교통망에서 다계층 확률적 사용자균형 통행배정모형을 풀기위한 변수를 정의하면 다음과 같다.

[변수정의]

c_k^m : 경로 k를 이용하는 계층 m의 통행비용
 $(c_k^m = \sum_i c_{inveh,i}^m \delta_{k,i} \quad \forall i \in A)$

c_i^m : 링크 i를 이용하는 계층 m의 통행비용

$c_{inveh,k}^m$: 경로 k를 이용하는 차내통행시간

$$(c_{inveh,k}^m = \sum_i c_{inveh,i}^m \delta_{k,i} \quad \forall i \in A)$$

$c_{inveh,i}^m$: 링크 i를 이용하는 차내통행시간

$$(c_{inveh,i}^m = \frac{Link \ length}{Ave. \ Speed \ of \ Link \ i})$$

$c_{wait,k}^m$: 경로 k를 이용하기 위해 계층 m이 기다리는데 소비하는 시간

$$(c_{wait,k}^m = \sum_i c_{wait,i}^m \delta_{k,i} \quad \forall i \in A)$$

$c_{wait,i}^m$: 링크 i를 이용하기 위해 계층 m이 기다리는데 소비하는 시간

$$(c_{wait,i}^m = \sum_i \frac{\alpha_i^m}{R_i} \delta_{k,i} + (\frac{\sum_j \beta_j^m * f_j^m}{K_i})^n \delta_{k,i})$$

$c_{tran,k}^m$: 계층 m이 경로 k를 이용할 때 수단이 다를 경우 부과되는 추가적인 통행비용으로 환승비용

R_i : 링크 i를 운행하는 수단의 배차간격 (단위 : 대/분)

f_k^m : 경로 k를 이용하는 계층 m의 통행량

$$(f_k^m = \sum_i f_i^m \delta_{k,i}, \text{ 단위 : person trip})$$

K_i : 링크 i를 이용하는 수단 M의 용량 (단위 : person/min)

α_i^m, β_i^m : 정산해야할 계수

c_k^m : 경로 k를 이용하는 계층 m의 동등경로통행비용

$$(c_k^m = c_k^m + \frac{1}{\theta^m} \ln(f_k^m))$$

T^m : 기점에서 종점까지 계층 m의 총 통행수요

θ^m : 분산파라미터 (통행자의 인지분산 값)

통행비용함수의 비대칭(asymmetric) 형태를 고려해, 비용함수를 구성하면 다음과 같다. 통행비용함수를 구성하는데 있어, 대중교통 체계개편이후 요금이 차지하는 비중은 극히 작아졌기 때문에 본 모형에서도 요금은 생략한다.

$$c_k^m = c_{inveh,k}^m + c_{wait,k}^m + c_{tran,k}^m$$

$$= \sum_i c_{inveh,i}^m \delta_{k,i} + \sum_i \frac{\alpha_i^m}{R_i} \delta_{k,i}$$

$$+ \sum_i (\frac{\sum_j \beta_j^m * f_j^m}{K_i})^n \delta_{k,i} + c_{tran,k}^m$$

위 함수형태를 바탕으로 2개 사용자 계층(계층 1:g1, 계층2:g2)을 가정할 때, 통행자 계층과 수단을

고려해 통행비용함수를 구성하면 다음과 같다. 이때 각 통행비용함수의 α_i^m , β_i^m 값은 통행자 계층과 통행수단에 따라 다른 값을 가진다.

[계층1의 경로 k의 통행비용함수]

$$c_k^{g1} = \sum_i c_{inveh, i} \delta_{k, i} + \sum_i \frac{\alpha_i^{g1}}{R_i} \delta_{k, i} + \sum_i \left(\frac{\beta_i^{g1} * f_k^{g1} + \beta_i^{g2} * f_k^{g2}}{K_i} \right) \delta_{k, i} + c_{tran, k}^{g1}$$

[계층2의 경로 k의 통행비용함수]

$$c_k^{g2} = \sum_i c_{inveh, i} \delta_{k, i} + \sum_i \frac{\alpha_i^{g2}}{R_i} \delta_{k, i} + \sum_i \left(\frac{\beta_i^{g1} * f_k^{g1} + \beta_i^{g2} * f_k^{g2}}{K_i} \right) \delta_{k, i} + c_{tran, k}^{g2}$$

위의 통행비용함수로 계산되는 다계층 확률적사용자균형 통행배정모형의 알고리즘을 구성하면 다음과 같다.

[단계0] 초기화

초기값 설정 : 초기 통행비용($\alpha_i^m(0)$), 통행수요(T^m), 분산 파라메타(θ^m), 오차율(ϵ)

[단계1] 대안경로설정

- (1.1) k-path 알고리즘을 이용해 대중교통 최적경로탐색
- (1.2) 공통성계수(CF_k) 계산
- (1.3) 반복수 $n=1$

[단계2] 링크비용 Relaxation

- (2.1) 부대각요소의 통행량을 고정시키고 주대각요소의 경로통행량을 구함
- (2.2) 경로통행비용($c_k^{m, n}$)과 공통성계수(CF_k)를 바탕으로 경로통행량($f_k^{m, n}$) 계산

$$f_k^{m, n} = T^m \frac{\exp[-\theta c_k^{m, n} - CF_k]}{\sum_w \exp[-\theta c_w^{m, n} - CF_w]}$$

[단계3] 경로통행비용갱신

- (3.1) 경로통행량 $f_k^{m, n}$ 를 기초로 경로통행비용 $c_k^{m, n}$ 계산

(3.2) 동등경로통행비용계산

$$c_k^{m, n} = c_k^{m, n} + \frac{1}{\theta^m} \ln(f_k^m)$$

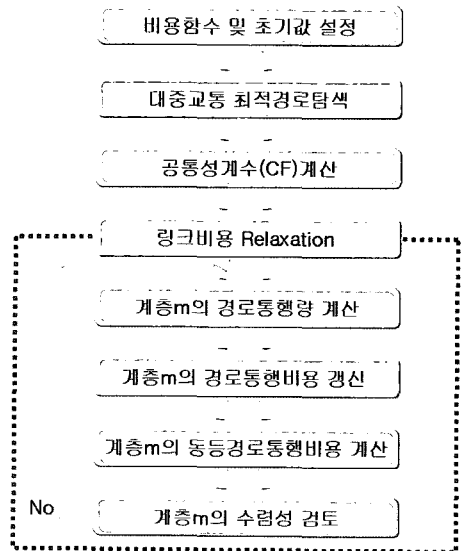
[단계4] 수렴성 검토

$$\frac{\max |C_k^{m, n} - C_k^{m, n-1}|}{\max \{C_k^{m, n}\}} < \epsilon \text{ 이면 정지, 아니면 } n=n+1$$

후 [단계2]로 이동

이때 경로는 버스와 지하철로 다수단으로 구성되고, 두 수단이 동시에 이용될 경우 수단간 전환이 이루어지면서 환승비용이 추가된다. 또한 [단계2]에서 경로통행량을 계산할 때 추가되는 공통성계수(CF)는 링크의 중복성을 고려하기 위해 추가되는 변수로 대안경로를 설정할 때 같이 계산된다. 이때 SUE문제를 풀기위해 일반적인 대각화 기법보다 실행이 용이한 streamlined 대각화 기법을 사용한다. 경로통행량이 구해지면, [단계3]에서 경로통행비용을 재계산해주고 확률적 사용자 균형상태를 만족시키는지 확인하기 위해 동등경로 통행비용을 계산한다. 동등경로 통행비용은 확률적 사용자 균형상태를 만족할 경우 각 경로를 이용하는 통행자의 인지통행시간이 같아지는지 확인하는 통행비용으로, 본 연구에서는 ϵ 을 설정해 [단계4]에서, 각 계층별로 수렴성을 검토한다.

이상으로 본 연구에서 제시한 다계층 확률적 사용자 균형 통행배정모형의 알고리즘을 순서흐름도로 살펴보면 <그림 2>와 같다.



(그림 2) 통행배정 알고리즘 흐름도

IV. 알고리즘의 검증

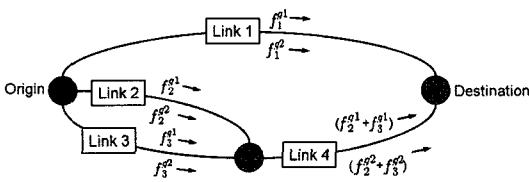
1. 알고리즘의 검증

본 장에서는 앞에서 제안된 알고리즘을 설명하기 위해 예제 네트워크에서 다양한 상황을 가정한 다계층 확률적사용자균형 통행배정 알고리즘의 검증을 수행하고자 한다. 검증을 위한 네트워크는 3개 노드와 4개 링크로 이루어진 소규모 예제 네트워크와 이신해(2003)에서 활용된 25개 노드와 80개 링크로 이루어진 대규모 네트워크로 구성하였다. 소규모 네트워크는 단일 기종점에 대해 다계층 통행배정결과를 확인하기 위한 대상이고, 대규모네트워크는 기종점 및 네트워크 규모의 확장을 통해 소규모 네트워크 분석결과에 대한 일관성을 검토한다.

1) 소규모네트워크

여기서는 본 연구에서 제시한 모형의 알고리즘을 이용해 예제 교통망을 대상으로 평가하고자 한다. 4개의 링크로 구성된 단순한 형태의 교통망으로 본 연구에서 제시한 알고리즘이 기본적인 내용을 제대로 반영하는지 알아보고, 확률적사용자균형 달성여부와 다계층 통행배정 결과를 확인하였다. 분석예제 네트워크는 <그림 3>과 같으며, 네트워크의 특징 및 파라미터는 다음과 같다.

3개의 정류장으로 구성되어 있으며, 기점과 종점을 제외한 정류장에서 환승 가능하다. 구성된 4개의 링크는 각각 'Link1'은 기점에서 종점까지 수단전환 없이 한 번에 가는 버스링크1, 'Link2'는 버스링크2, 'Link3'은 버스링크3, 'Link4'는 'Link2' 또는 'Link3'에서 수단전환해 이용하는 지하철링크라 가정한다. 이용 가능한 경로는 3개로, 'Link1' 또는 'Link2→Link4' 또는 'Link3→Link4' 이며, 각 링크를 이용하는 통행자 계층은 2개이다. 통행자 계층1(g1)은 계층 2에 비해 통행량이 크고, 평균대기시간과 환승저항이 계층 2에 비해 작다. 반



<그림 3> 소규모네트워크

면 통행자 계층2(g2)는 계층 1에 비해 통행량이 작고, 평균대기시간과 환승저항이 계층 1에 비해 크다. 본 모형을 풀기 위해 입력된 변수와 파라미터는 다음과 같다.

- $\theta = 0.07$
- 계층1의 통행량 = 100
- 계층2의 통행량 = 50
- $C_{tran}^1 = 4, C_{tran}^2 = 8$
- $CF_1 = 0, CF_2 = 2, CF_3 = 2$
- 링크별 차내통행시간, 대기시간 및 용량

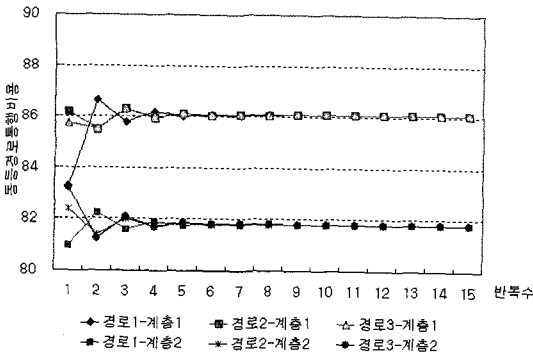
	차내통행시간	배차간격	용량
링크1	20	10	20
링크2	10	4	20
링크3	10	7	20
링크4	10	5	40

- 파라미터 $\alpha^1 = 0.5, \alpha^2 = 1$
- 파라미터 β^n : 각 링크별로 통행자의 특성을 반영할 수 있도록 다양한 값 적용

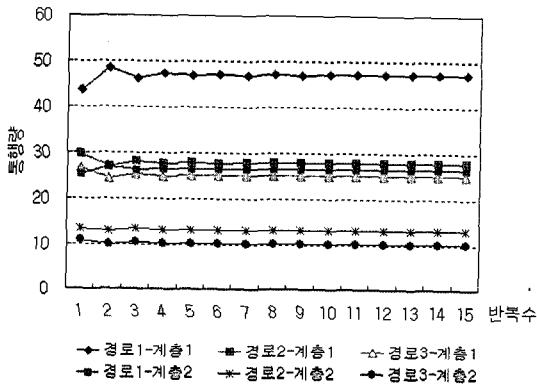
간단한 교통망을 대상으로 분석해본 결과 각 계층별로 각 경로에서 확률적사용자균형상태에 도달하고 있는데 최종적으로 도출된 값은 <표 2>와 같다. 표에서 알 수 있듯이 경로2와 경로3보다 경로1에 더 많은 통행량이 배정되는 것을 볼 수 있다. 또한 경로통행비용은 같지 않지만 동등경로통행비용이 각 계층별로 같아짐을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 알고리즘의 결과 값이 확률적 사용자균형상태에 도달했음을 알 수 있고, 각 계층별로 동등경로 비용이 다르게 다계층 통행배정된 것을 볼 수 있다. 또한 입력 변수 및 파라미터에 따라 차이가 있었지만 수렴속도도 상당히 빠르게 나타났다. 반복수에 따른 동등경로통행비용과 배정된 통행량이 <그림 4>와 <그림 5>에 나타나 있으며, 그때 오차율을 <그림 6>에 나타내었다. 그림에서 나타났듯이 7번째에서 수렴함을 알 수 있다.

<표 2> 소규모네트워크에서 통행배정결과

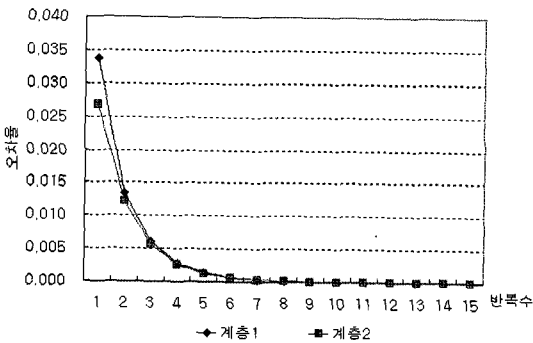
구분	계층	통행량	경로통행비용(α^k)	동등경로통행비용(C^k)
경로1	계층1	47.10	31.03	86.07
	계층2	26.48	35.00	81.81
경로2	계층1	27.80	38.57	86.07
	계층2	13.26	44.88	81.81
경로3	계층1	25.10	40.02	86.07
	계층2	10.26	48.55	81.81



〈그림 4〉 소규모네트워크에서 각 경로별/계층별 동등경로통행비용



〈그림 5〉 소규모네트워크에서 각 경로별/계층별 배정된 통행량



〈그림 6〉 소규모네트워크에서 각 계층별 동등경로통행비용의 오차율

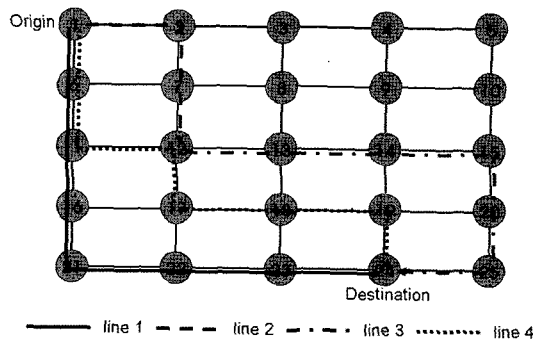
앞에서 가정했듯이 계층별 차이를 살펴보면, 계층1은 통행량이 많고 통행저항이 작아 경로 통행비용이 계층 2보다 작다. 또한 통행량이 많아 인지분산의 오차가 크게 나타나기 때문에 동등경로 통행비용이 계층 2보다 크게 나온다. 경로별 차이를 살펴보면 경로1은 환승을 하지 않아 통행비용이 작은 반면 통행량은 경로2와 경로3에 비해 크게 나타난다. 또한 경로통행비용은 배차간격이

더 큰 버스링크3을 이용하는 경로3이 가장 크게 나타나며, 동등경로통행비용은 각 계층별로 '86.07'과 '81.81' 값을 가지며 경로별로 같은 값을 나타낸다. 오차율은 매우 작으며 수렴속도가 매우 빠르게 나타난다.

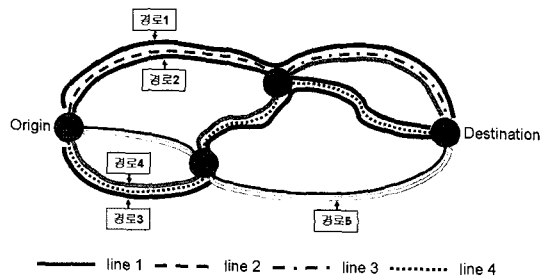
2) 대규모네트워크

앞에서 제시한 예제 네트워크를 발전시켜 이신해(2003)에서 활용된 25개 노드와 40개 링크로 이루어진 대규모 네트워크에 적용하였다. 링크의 속성을 다양하게 하고, OD를 늘려 다양한 승하차 행태를 반영하였을 뿐 아니라, 대안경로의 수 및 계층별 분산계수를 다르게 적용하였다. 네트워크는 25개의 정류장으로 구성되어 있으며, 각 노선이 교차되는 지점인 11번과 12번 정류장에서 환승 가능하다. 구성된 4개의 노선은 출발노드에서 도착노드까지 총 5개의 경로를 포함한다. 즉 '경로1 : Line2 → Line3', '경로2 : Line2 → Line4', '경로3 : Line4', '경로 4: Line4 → Line3', '경로 5 : Line1'을 포함하며, 추가된 OD쌍은 12번에서 24번으로 통행량을 나타내며, 가능한 경로는 'Line3'과 'Line4' 2개가 존재한다.

분석예제 네트워크 및 경로는 〈그림 7〉, 〈그림 8〉과 같다.



〈그림 7〉 대규모 네트워크



〈그림 8〉 대규모네트워크의 대안경로

구성된 5개의 경로는 각각 경로3과 경로5를 제외한 경로1, 경로2, 경로4는 환승을 해야 도착할 수 있으며, 이때 각 링크를 이용하는 통행자 계층은 2계층으로 가정한다. 통행자 계층1(g1)은 계층 2에 비해 통행량이 크고, 환승저항은 계층 2에 비해 작으며, 통행시간에 대한 분산이 계층2보다 작다. 반면 통행자 계층2(g2)는 계층 1에 비해 통행량이 작고, 환승저항이 계층 1에 비해 크며, 통행시간에 대한 분산도 계층1보다 크다. 또한 소규모네트워크와 달리 통행량에 증가에 따른 영향을 크게 하기 위해 'n=2'로 설정한다. 본 모형의 알고리즘을 풀기 위해 설정된 비용함수와 네트워크 설정값 및 알고리즘 단계별 수행결과는 소규모 네트워크에서 진행되는 과정과 같으며 입력된 변수 및 파라미터는 다음과 같다.

- $\theta^1 = 0.05, \theta^2 = 0.10$
- g1의 통행량 = (1→24 : 400), (12→24 : 100)
- g2의 통행량 = (1→24 : 50), (12→24 : 20)
- $C_{am}^1 = 4, C_{am}^2 = 8$
- $CF_1=2, CF_2=2, CF_3=2, CF_4=2, CF_5=0$
- 링크별 차내통행시간, 대기시간 및 용량

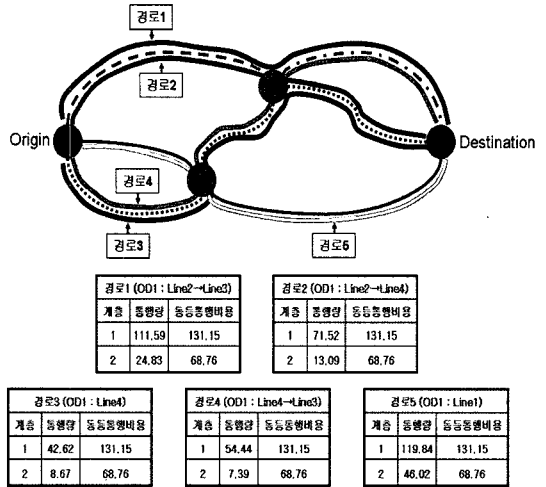
노선	차내통행시간	배차간격	용량
노선1	각 노드간 2분	10	50
노선2		5	50
노선3		3	500
노선4		12	50

- 파라미터 $\alpha^1 = 0.5, \alpha^2 = 0.4$
- 파라미터 β^n : 각 링크별로 통행자의 특성을 반영할 수 있도록 다양한 값 적용

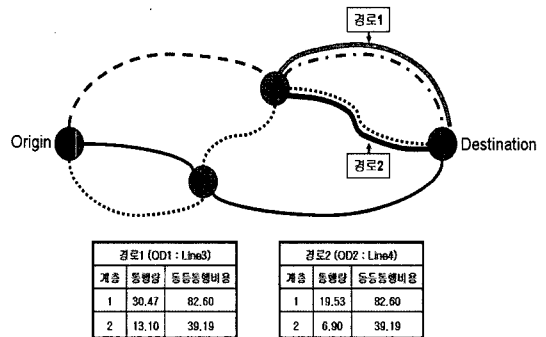
통행배정 과정의 반복을 통해 각 계층별, 경로별 통행량과 동등경로통행비용은 'n=30'까지 수행했을 때 경로통행량과 동등경로통행비용은 반복수가 증가함에 따라 일정한 값에 도달해 가는 것을 알 수 있으며, 본 예제의 조건에서는 'n=26'에서 ' $\epsilon < 0.0001$ ' 조건을 만족해 수렴함을 볼 수 있다. 이때 각 계층별로 확률적 사용자평형 상태를 보인다.

대규모 네트워크를 대상으로 분석해본 결과 각 계층별로 각 경로에서 확률적 사용자균형상태에 도달하고 있는데, 각 OD쌍에 대해 각 경로별로 동등경로통행비용이 같아진다. 분석결과 최종적으로 도출된 값은 <표 3>과 같다. 표에서 알 수 있듯이 통행비용이 작은 경로 1과 경로5에 다른 경로보다 더 많은 통행량이 배정되

[OD1 : 1 → 24]



[OD2 : 12 → 24]



<그림 9> 대규모네트워크에 배정된 통행량 및 동등경로통행비용

<표 3> 대규모네트워크에서 통행배정결과

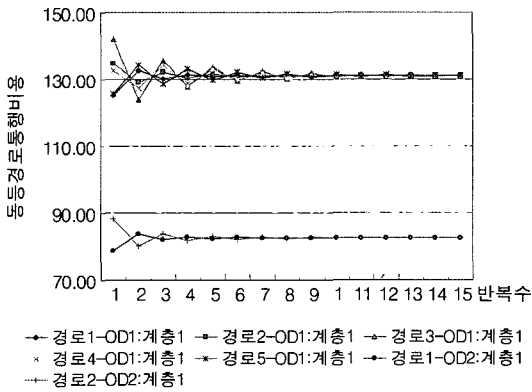
구분		통행량	경로통행비용	동등경로통행비용
계층 1	OD1	경로1	111.59	131.15
		경로2	71.52	131.15
		경로3	42.62	131.15
		경로4	54.45	131.15
		경로5	119.83	131.15
	OD2	경로1	30.47	82.61
경로2	19.53	82.61		
계층 2	OD1	경로1	24.83	68.76
		경로2	13.09	68.76
		경로3	8.67	68.76
		경로4	7.39	68.76
		경로5	46.02	68.76
	OD2	경로1	13.10	39.19
경로2	6.90	39.19		

는 것을 볼 수 있다. 또한 경로통행비용은 같지 않지만 동등경로통행비용이 각 계층별, OD쌍별로 같아짐을 확인할 수 있다. '노선 3'의 경우 지하철 네트워크 속성을 고려해 용량과 배차간격을 설정한 결과 다른 노선에 비해 통행량이 크게 나타났고, 이를 이용하는 '경로 1'과 '경로 4'의 경우 다른 경로에 비해 배정된 통행량이 큰 것을 알 수 있다.

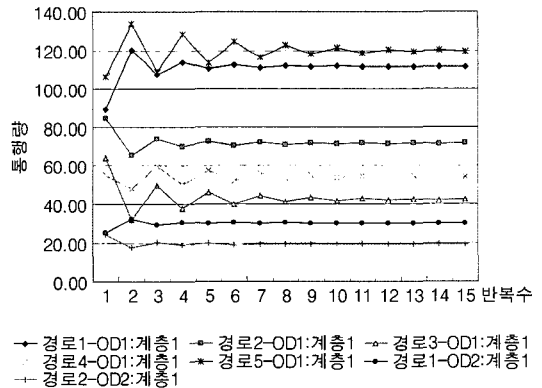
계층별 차이를 살펴보면, 소규모네트워크와 달리 통행량에 따른 통행비용의 증가형태를 'n=2'로 크게 설정했기 때문에, 통행량에 따른 영향이 더 크게 나타났다. 즉 계층1은 통행량이 많아 경로통행비용 및 동등경로통행비용이 계층 2보다 크고, 계층2는 이보다 작게 나온다. 경로별 차이를 살펴보면 경로3과 경로5는 환승을 하지 않아 환승을 하지 않아 통행량이 클 것으로 보였으나, 경로중복과 링크교통량, 링크차내통행시간을 고려할 때

경로3의 경우 많은 통행이 이루어 지지 못하고 있다. 동등경로통행비용은 각 계층별로 OD쌍 1에 대해 '131.15'와 '68.76' 및 OD쌍 2에 대해 '82.61'과 '39.19'의 값을 가지며 경로별로 같은 값을 나타낸다. 오차율은 매우 작으며 수렴속도가 소규모네트워크 보다 약간 느리지만 빠른 속도를 나타낸다.

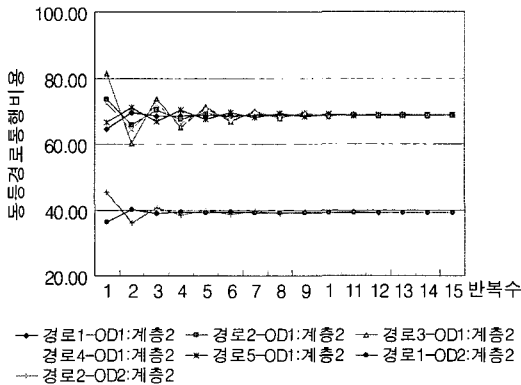
따라서 본 연구에서 제시한 알고리즘의 결과 값이 네트워크 확장시에도 확률적 사용자균형상태에 도달했고, 각 계층별/OD쌍별로 동등경로 비용이 다르게 다계층에 통행배정된 것을 볼 수 있다. 또한 입력 변수 및 파라미터에 따라 차이가 있겠지만 수렴속도도 상당히 빠르게 나타났다. 반복수에 따른 동등경로통행비용과 배정된 통행량이 <그림 10>~<그림 13>에 나타나 있으며, 그때 오차율을 <그림 14>에 나타내었다. 그림에서 나타났듯이 26번째에서 수렴함을 알 수 있다.



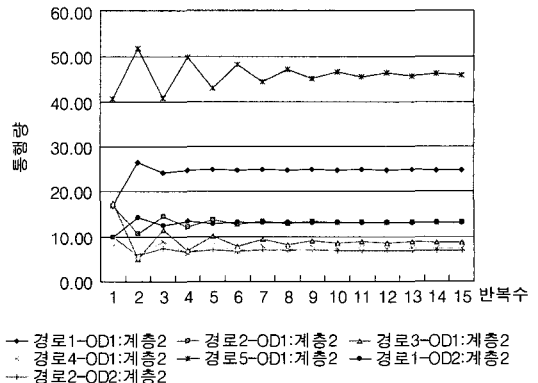
<그림 10> 대구모네트워크에서 각 경로별/OD쌍별, 계층1의 동등경로통행비용



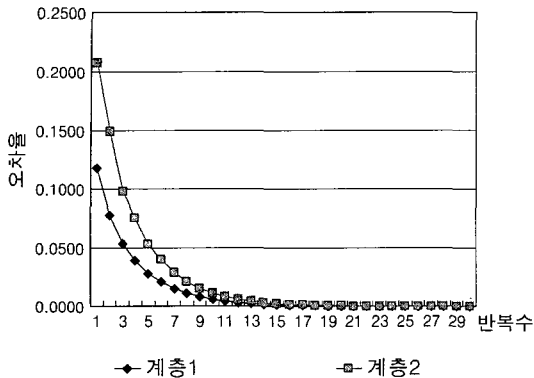
<그림 12> 대구모네트워크에서 각 경로별/OD쌍별, 계층1의 배정된 통행량



<그림 11> 대구모네트워크에서 각 경로별/OD쌍별, 계층2의 동등경로통행비용



<그림 13> 대구모네트워크에서 각 경로별/OD쌍별, 계층2의 배정된 통행량



(그림 14) 대규모네트워크에서 각 계층별 동등경로통행비용의 오차율

V. 결론 및 향후연구

본 논문은 기존의 대중교통 통행배정모형이 제대로 반영하지 못하는 승객의 이질적 속성을 모형에 정확히 반영하는 방법에 관한 연구이다. 승객의 이질적 속성을 고려하는 기존의 방법은 대부분 확률적 통행배정모형의 적용을 통해 이루어졌으며, 통행자 계층의 평균적인 속성을 기준으로 평가되었다. 그러나 통행패턴이나 통행속성이 명확히 구별되는 통행자 집단에 대해서는 정확한 분석을 위해 계층의 구별이 필요함을 느껴 본 연구를 진행하게 되었다. 예를 들어 통행목적에 따른 통행의 경우 통근/통학 통행과 여가통행은 분명한 차이를 보일 것이고, 연령에 따라서는도 경로선택에 있어 환승에 대한 의존도나 수단 선택에 관한 결과도 다를 것으로 보인다. 결과적으로 인지 분산통행시간의 차이를 보이게 되는 것이다.

본 연구에서는 이러한 점에 착안해 통행자 계층을 여러 개로 구분해 통행배정 할 수 있는 다계층 알고리즘을 개발하였다. 또한 통행자 계층별로 이질적 속성을 더 정확히 반영하기 위해 확률적 통행배정을 하였다. 또한 기존 Lam W.H.K.(1998b)의 한계점을 극복하기 위해 계층 간의 통행량에 영향을 받는 통행비용함수를 구축하였고, 기존 로짓모형의 단점으로 나타난 비관련대안의 독립성(IIA)문제를 해결하기 위해 C로짓모형을 적용하였다.

연구결과 각 계층별로 뚜렷한 차이를 보이며, 확률적 사용자균형 상태에 이르렀다. 또한 수렴속도도 빠르게 나타났으며, 확률적 사용자 균형에 가까워지며 각 계층별/경로별 통행량도 수렴함을 확인 할 수 있었다. 대규모네트워크의 경우 소규모네트워크에서 1개 OD쌍을 적용한 것과 달리 2개 OD쌍을 적용하였는데, 각각의 OD

쌍에서 계층별/경로별 통행량에 따라 통행배정이 이루어지며 확률적 통행배정이 이루어짐을 볼 수 있다.

본 연구의 알고리즘은 향후 통행목적별 OD자료를 이용한 대중교통 통행배정결과를 얻거나, 특정 통행자 계층, 즉 고령자를 고려한 대중교통 정책 등의 평가에 활용이 가능하며, 승객의 이질적 속성 파라미터를 다양하게 적용해 봄으로써 다양한 기준을 반영한 결과를 도출해 내는 도구로 활용할 수 있다.

본 연구에서 개발한 알고리즘을 좀 더 현실성 있게 적용하기 위해서는 몇 가지 향후연구가 더 필요하다.

첫째, 연구진행과정에서 지하철 네트워크와 버스 네트워크는 개별차량의 영향을 받지 않는다고 분석하였다. 그러나 실제 지하철 네트워크는 독립적으로 볼 수 있지만, 버스네트워크는 개별차량과 같은 가로망을 이용하기 때문에 어느 정도 영향을 받는다. 따라서 향후 개별차량과의 영향을 고려한 연구를 통해 좀 더 정확한 연구결과를 도출해 낼 수 있다.

둘째, 예제모형에서 가정한 각 파라미터의 정산을 통해서 좀 더 현실성 있는 모형으로 구축될 수 있을 것이다. 통행배정과정에서 가정한 분산계수 θ 나 α , β 및 환승비용의 경우 적용의 한계성이 있다. 따라서 연구목적에 따라 정산된 파라미터를 적용함으로써 정확한 통행배정결과를 도출해 낼 수 있다. 또한 정산된 파라미터를 이용해 다양한 값의 적용을 통해 시나리오 평가가 가능하다.

셋째, 확률통행배정과정에서 본 연구에서 적용한 직접로짓배정법은 본 연구 예제에서는 수렴속도가 빠르게 나타났으나, 분석시 교통망이 더 커지고 복잡해지 질수록 수렴속도가 점점 늦어지며 해를 찾기 힘들 것으로 생각된다. 따라서 향후 현실 교통망에서 검증이 요구되며, 로짓통행배정시 해를 찾는 과정에 있어서도 수리최소화방법이나 연속평균법(MSA)을 이용한 방법을 적용하는 것이 필요하다.

넷째, 본 연구에 적용한 확률로짓통행배정법에서는 다수경로선택이 중요한 역할을 담당하는데, 교통망이 복잡해 질 경우 합리적인 경로선택에 따라 배정통행량이 크게 달라진다. 따라서 연구목적에 맞는 경로선택방법에 관한 연구가 더 필요하다.

참고문헌

1. 임강원·임용택(2003), 교통망분석론, 서울대학교 출판부.

2. 김현명 · 임용택 · 이승재(1999), 통합교통망 수단 선택-통행배정모형 개발에 관한 연구, 대한교통학회지, 제17권 제5호, 대한교통학회, pp.87~98.
3. 이성모 · 유경상 · 전경수(1996), 차량용량을 고려한 대중교통 통행배정모형구축에 관한 연구, 대한교통학회지, 제14권 제3호, 대한교통학회, pp.27~44.
4. 이신해 · 최인준 · 이승재 · 임강원(2003), 유전자 알고리즘을 이용한 대중교통 통행배정모형 개발, 대한교통학회지, 제21권 제1호, 대한교통학회, pp.65~75.
5. 이재섭(1999), 대중교통 수단간의 환승을 고려한 확률적 대중교통 통행배정기법의 개발.
6. 임용택(2003), 확률적 로짓 통행배정모형의 해석 알고리즘, 대한교통학회지, 제21권 제2호, 대한교통학회, pp.95~105.
7. 조용학(1999), C-로짓을 이용한 노선기반 확률 노선배정기법의 개발, 한양대학교 석사학위논문.
8. Cascetta E., et al.(1996), A modified logit route choice model overcoming path overlapping problems, Specification and some calibration result for interurban networks, Transportation and Traffic Theory.
9. De Cea. J. and J. E. Fernandez(1996), An Empirical Comparison of Equilibrium and Non-Equilibrium Transit Assignment Models, Traffic Engineering & Control, pp.441~445.
10. Jayakrishnan. R, McNally. M. G, Marar, A. G(1995), Recursive structure for exact line probabilities and expected waiting times in multipath transit assignment, TRR 1493.
11. Lam. W.H.K., Z.Y. Gao, K.S. Chan, and H. Yang(1998a), A stochastic user equilibrium assignment model for congested transit networks, Transportation Research 33B, pp.351~368.
12. Lam. W.H.K. and Zhou J.(1998b), A stochastic transit assignment Model for Multi-class users, Hong Kong Society for Transportation Studies 1998, pp.63~74.
13. Nguyen. S, Pallottino. S, Gendreau. M(1998), Implicit enumeration of hyperpaths in a logit model for transit networks, Transportation Science, Vol.32, pp.54~64.
14. Nielsen O. A(2000), A stochastic transit assignment model considering differences in passengers utility functions, Transportation Research Part B 34, pp.377~402.
15. Yen J.Y(1971), Finding the K shortest loopless paths in a network, Management Science, Vol.17 No.11, pp.712~716.

✉ 주 작 성 자 : 유순경
 ✉ 논문투고일 : 2005. 11. 30
 논문심사일 : 2005. 12. 15 (1차)
 심사판정일 : 2005. 12. 15
 ✉ 반론접수기한 : 2006. 4. 30