

■ 論 文 ■

버스 노선망 설계 문제(BTRNDP)의 고찰

Reviews of Bus Transit Route Network Design Problem

한 종 학

(인천발전연구원 교통물류연구실 연구위원)

이 승 재

(서울시립대학교 교통공학과 교수)

임 성 수

(인천발전연구원 교통물류연구실 연구실장)

김 종 형

(인천발전연구원 교통물류연구실 연구위원)

목 차

- I. 서론
- II. 버스 대중교통 계획과정
 - 1. 버스 대중교통의 운행 및 이용 특성
 - 2. 버스 대중교통체계의 계획과정
- III. BTRNDP의 연구방법론 분류
 - 1. 적용 모형
- 2. BTRNDP의 모형구성
- IV. BTRNDP에 적용된 통행배분모형
 - 1. 승용차통행배분과 다른 점
 - 2. BTRNDP를 위한 통행배분모형
- III. 결론 및 향후 연구방향
- 참고문헌

Key Words : 버스 노선망 설계 문제(BTRNDP), 조합최적화문제, 최적 버스 노선망, 후보노선집합, Meta-heuristic 알고리즘, 다중경로 통행배분모형

요 약

버스 대중교통은 정해진 노선, 운행시간표에 의해 정류장을 경유하여 운행하므로 버스 노선망 설계 문제(BTRNDP: Bus Transit Route Network Design Problem)는 승용차위주의 가로망 설계 문제와 다른 접근방법이 요구된다. 버스 노선망 설계 문제의 적용모형은 설계방법의 역사적발전과정에 따라 매뉴얼 및 지침, 시장분석기법, 시스템해석모형, 휴리스틱모형, 하이브리드 모형, 경험기반모형, 시뮬레이션모형, 수리최적화모형 등 크게 8가지 분류할 수 있다. BTRNDP는 이용자비용과 운영자비용의 조합인 총비용을 최소화하는 목적함수를 획득하기 위한 일련의 현실적 제약조건하에서 버스노선집합과 배차횟수를 결정하는 문제이다. BTRNDP는 조합최적화문제로 일반적 수리최적화문제로 가능해 공간을 정의하는 것이 어렵기 때문에 모든 가능해로 구성된 큰 탐색공간으로부터 최적해를 탐색해야하는 NP-Hard라는 특성을 가진다. BTRNDP의 목적함수는 이용자와 운영자관점을 모두 고려한 다목적함수(Multi-Objective Function)를 이용하며 수요는 고정수요를 이용하였으나 최근에는 가변수요를 고려한 방법론이 연구되고 있다. 해알고리즘으로 최적 버스 노선망을 구성하게 될 모든 가능한 후보노선집합(Candidate Route Set)을 생성하고 노선집합의 최적조합을 찾는 메타휴리스틱(Meta-heuristic)알고리즘을 이용하여 전역최적 노선집합을 찾는 방법이 적용되고 있다. 최적 버스 노선망의 배차횟수를 결정하기 위해서 대중교통 통행배분모형이 필요한데 BTRNDP에 적용되는 통행배분모형은 다중경로 통행배분모형이 주로 활용되었다. 국내의 BTRNDP를 고찰한 결과 주요 시사점으로는 BTRNDP에서 가장 중요한 고려사항은 세분화된 버스정류장 기반 기중점통행량 구축, 버스 노선망 평가모형 및 대중교통 통행배분모형의 개발, 탐색 해알고리즘의 개발 등의 향후 연구내용이 포함될 수 있다.

This paper is to review a literature concerning Bus Transit Route Network Design(BTRNDP), to describe a future study direction for a systematic application for the BTRNDP. Since a bus transit uses a fixed route, schedule, stop, therefore an approach methodology is different from that of auto network design problem. An approach methodology for BTRNDP is classified by 8 categories : manual & guideline, market analysis, system analytic model, heuristic model, hybrid model, experienced-based model, simulation-based model, mathematical optimization model. In most previous BTRNDP, objective function is to minimize user and operator costs, and constraints on the total operator cost, fleet size and service frequency are common to several previous approach. Transit trip assignment mostly use multi-path trip assignment. Since the search for optimal solution from a large search space of BTRNDP made up by all possible solutions, the mixed combinatorial problem are usually NP-hard. Therefore, previous researches for the BTRNDP use a sequential design process, which is composed of several design steps as follows: the generation of a candidate route set, the route analysis and evaluation process, the selection process of a optimal route set

Future study will focus on a development of detailed OD trip table based on bus stop, systematic transit route network evaluation model, updated transit trip assignment technique and advanced solution search algorithm for BTRNDP

I. 서론

버스 노선망 설계문제(Bus Transit Route Network Design Problem)는 시스템성과 자원의 제약을 반영하는 다양한 제약조건 하에서 목적함수의 최소(최대)화에 관련된 다목적 혼합정수 모형의 특성을 가진 문제이다. 최근 서울시 버스교통체계개편사업에서도 많은 버스관련 세부사업들이 진행되었으나 버스 노선망을 설계하기 위한 과학적이고 체계적인 절차들이 고려된 모델링이 버스교통체계개편계획에 제대로 반영되지 못하였다. 주로 계획가와 연구자의 직관과 경험과 기존 버스노선망에 대한 지식에 의존적인 방법으로 진행되는 것이 일반적 방법론이었다. 버스 노선망 설계는 버스 이용자의 서비스수준을 결정하는 중요한 문제이며, 운행시간표, 차량운행계획을 위한 입력값을 결정하는 중요한 과정이라 할 수 있다. 그럼에도 불구하고 버스 노선망 설계 문제가 대중교통계획에 제대로 반영되지 못하고 궁극적으로 계획과정의 비효율성을 가져온 원인은 3가지 측면에서 생각해 볼 수 있다.

첫째, 오늘날 대중교통계획은 계획가의 경험, 판단과 기존 통행패턴에 대한 지식에 매우 의존적이다. 이러한 노선망 설계방법은 통행수요예측과 통행배분모형과 같은 섬세한 모형도구들이 있음에도 불구하고 간단한 설계방법을 이용하여 노선망의 배치(layout)와 대중교통 노선망의 기본골격을 방사형(radial)과 격자형(grid)을 위주의 노선망을 유지하여 왔다.

둘째, 계획가와 이해당사자들간에 존재하는 버스교통계획과정의 인식의 차이를 생각해 볼 수 있다. 버스 노선망 설계와 관련된 이해당사자들로는 버스운송업체, 버스이용승객, 지역사회 등이 있을 수 있다. 계획가가 노선망 설계 과정에서 이해당사자들의 완전한 합의를 이끌어내는 것은 매우 어려운 일이다. 결과적으로 대부분의 계획가는 일련의 반복적 설계과정을 수행할 수밖에 없다. 이러한 수행과정에서 그래픽지원시스템(Interactive Graphic System)은 버스 노선망의 작성 및 수정에 많은 도움을 제공하였다. 그러나 노선망을 생성해내기 위한 체계적인 방법론은 여전히 필요하다.

셋째, 이론적 측면에서 배차횟수(frequency), 차량용량(Vehicle size), 노선간격(Route spacing) 등과 같

은 결정변수는 노선망 설계 문제의 변수로 설정될 수 있지만 노선수와 노선의 노드구성 등과 같은 변수는 정의하기 어렵다. 또한 버스노선수요를 결정하기 위한 대중교통 통행배분은 수리모형식으로 표현하기가 어렵다. 노선선택문제의 이산적 특성 때문에 노선선택은 비볼록(non-convex) 최적화문제(또는 정수계획문제)로 정의된다. 최적 버스 노선망 구조의 선택은 NP-hard특성을 갖는 조합문제가 된다. 따라서 대규모 가로망에서 최적화문제로 버스 노선망 설계 문제를 접근하는 데는 어려움이 있다.

국내에는 이해당사자간 합의를 이끌어낼 수 있는 표준화되고 체계화된 버스노선망 설계방법론이 아직 확립되어 있지 못하고 있으며, 교통수요분석프로그램(EMME/2)을 이용한 버스통행수요분석차원의 버스노선조정효과를 평가하는 수준에서 노선망 설계문제를 다루고 있다.¹⁾ 국외의 경우 30~40년간 버스노선망 설계문제에 대한 방법론의 연구가 진행되어 왔으며, 일부 연구방법론은 실제 노선망을 대상으로 모형이 적용된 바 있다.²⁾

본 연구는 버스 노선망 설계문제와 관련하여 국내외에서 연구 검토된 방법론에 대해서 고찰하고 향후 체계화된 버스 노선망 설계방법론을 구축하기 위한 개선방향에 대해서 논하고자 한다.

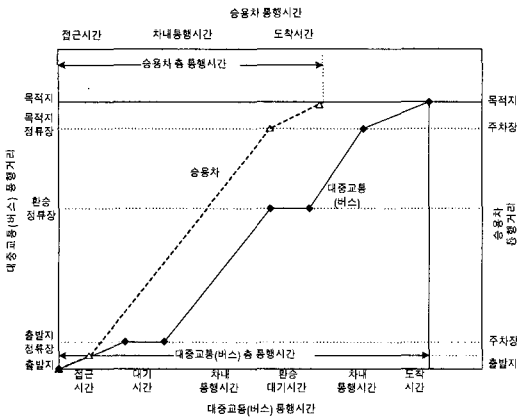
II. 버스 대중교통 계획과정

1. 버스 대중교통의 운행 및 이용 특성

버스 대중교통은 정해진 노선, 운행시간표에 의해서 정류장을 경유하여 운행한다. 이러한 운행특성은 버스 대중교통 이용자의 통행시간에 영향을 준다. 정해진 노선은 이용자들의 차내통행시간에 영향을 미치게 된다. 최단시간을 갖는 노선경로를 대안 노선으로 이용하더라도 차내통행시간은 자가용 통행시간에 비교해 추가적으로 소요된다. 주어진 운행시간표는 정류장에서 이용자들의 대기시간과 관련성을 가지며 대기시간은 서비스 배차횟수와도 관련성이 깊다. 정류장 위치는 버스 대중교통이용자들의 접근 거리 및 시간에 영향을 미치는 주요한 요인이라 할 수 있다. 운영자의 제약조건으

1) 유영근(1997), 백혜선(1999), 황준환 외(2003), 이상용 외(2003)

2) Ceder(2002)는 도미니카공화국의 수도 Santo Domingo를 대상으로 수행하였으며, Shih et al(1994)는 미국 텍사스 오스틴을 대상으로 Zhaou(2003)는 미국 플로리다, 마이애미를 대상으로 버스 노선망 설계 문제를 적용하였음.



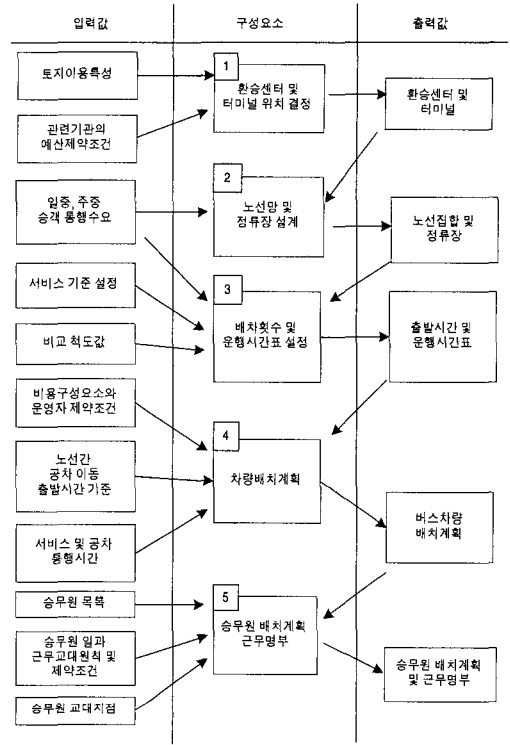
〈그림 1〉 승용차와 대중교통(버스) 통행시간구성

로 대중교통 서비스들은 모든 출발지에서 모든 도착지까지 직결서비스를 제공할 수 없기 때문에 출발지와 도착지들간 환승 통행이 불가피할 수 있다. 환승은 버스 노선망의 형태에 따라 결정된다. 이러한 버스 대중교통 운행 및 이용특성으로 인하여 버스대중교통 계획과정은 승용차 위주의 가로망 설계 문제(Network Design Problem)와는 다른 접근방법이 요구된다.

2. 버스 대중교통체계의 계획과정

Ceder(2003)는 전체적인 버스계획과정을 체계적인 결정과정으로 정의하였으며, 〈그림 2〉과 같은 5가지 수준의 계획과정을 제시하였다. 계획과정은 가장 높은 비용에서 낮은 비용을 가지는 순서로 진행되며, 상위수준 계획과정의 결과값은 하위수준 계획과정의 입력값으로 이용되는 과정을 거치게 된다.

계획과정내 각 수준은 상호간에 의존적인 관계로 반복적 환류 과정이 요구된다. 기존 버스 대중교통체계의 연구는 차량배치계획(Bus Scheduling)이나 승무원 배치계획(Driver Scheduling)에 대한 연구에 국한되었다. 이러한 2가지 수준에 대한 연구의 집중은 스케줄링 과정의 자동화의 필요성이 운영자의 높은 관심을 불러 일으켰고, 운영자 비용에 직접적인 영향을 미치는 운전자의 임금, 차량의 주행 및 유지관리비용과 관련성이 높는데 기인하였다. 그러나 운영자와 이용자 관점에서 버스 노선망 구조와 배차횟수는 산출 방법론의 복잡성 때문에 관심을 덜 받아왔다. 승용차에 밀려 감소하는 버스이용수요로 인한 대중교통의 재정 악화를 극복하기 위한 방법으로 버스 노선망 구조 및 서비스 배차



〈그림 2〉 버스 대중교통 계획과정

횟수 계획이 주목을 받게 되었다. 지방정부로부터 제한적인 보조금은 받는 운영자 입장에서 보면 인원과 차량들의 스케줄링을 개선함으로써 비용을 절감하거나 버스 노선망 구조의 개선 및 서비스 배차횟수의 정시성을 향상시키는 것이 중요한 버스 대중교통계획과정의 일부 분을 차지하게 되었다.

III. BTRNDP의 연구방법론 분류

1. 적용 모형(Model formulation)

버스 노선망 설계문제에서 적용 모형의 선택은 연구의 중요도, 목적 또는 적용의 편리성에 따라 일부 연구자 개인의 성향·의견 또는 전문성을 반영하거나 부분적으로 선호도를 반영하기도 한다.

Chua and Silock(1982)는 주로 과거의 대중교통망 설계방법의 역사적 발전과정을 반영하는 분류방법에 따라, 매뉴얼 및 지침(Manual approach using service standards and guidelines), 통행수요 및 통행배분모형을 이용한 체계 분석법(Systems analysis using

standard travel demand and trip assignment models), 교통축 및 소규모지역에 대한 통행배분을 이용한 시장분석(Market analysis using manual trip assignment for corridors or small areas), 대화식 그래픽을 이용한 체계 분석(System analysis with interactive graphics), 휴리스틱 방법(Heuristic procedures), 수리최적화 방법(Mathematical optimization) 등 6가지로 분류하였다.

Ceder and Israeli(1998)은 대중교통 노선망 설계 문제를 승객통행량을 시뮬레이션하는 모형, 모의 가로망을 대상으로 정책변수 산정을 위한 해석적 모형과 수리모형 등 3가지로 구분하였다.

Tom and Mohan(2003)은 실제 가로망에 적용되는 대중교통 노선망 설계문제는 조합문제로, 기존 대부분의 연구들이 내재적 열거방법(implicit enumeration method)을 사용하였다. 이러한 문제는 NP-complete의 특징을 가지며, 다항식 증가 알고리즘(polynomial growth algorithm)으로 최적화될 수 없다고 하였다. 기존 연구들을 해석적모형, 휴리스틱모형, 하이브리드 모형, 경험기반모형, 시뮬레이션모형 등 5가지 부류로 구분하였다. 적용모형의 일반적 분류는 다음과 같다.

1) 경험기반모형(experienced based model)

수 년 동안 노선망 계획가가 취득하여 온 경험은 대중교통운영, 특히 체계적 계획에 의한 접근방법이 적용되지 못한 개발도상국 도시의 대중교통운영에 있어서는 매우 소중한 접근방법일 수 있다. 지식기반 전문가 시스템은 설계에 적용되는 법칙의 형태로 경험 많은 전문가의 지식이 반영된 시스템이다. 이러한 접근방법의 주요 어려움은 지식기반의 전문성을 명확히 표현하는데 있다. 그리고 이러한 법칙은 시스템 나름의 속성에 기반을 두고 있기 때문에, 전문가의 경험에 기반 한 지식은 다른 가로망에 대한 이식성(transferability)이 낮을 수 있다.

2) 시뮬레이션모형(Simulation model)

버스운영에 영향을 주는 많은 변수들간의 복잡한 관계들을 다루기 위해서 대규모의 데이터가 필요하며, 최적 버스 노선망의 생성여부는 불확실할 수 있다. Vandebona et al.(1985), Dhingra et al.(1993) 연구에서 적용된 바 있는 시뮬레이션모형은 주로 개별노선들 또는 작은 규모의 대중교통 노선망에 국한되어 적용되었다. 그

러나 노선들의 상호관계, 노선 중복에 따른 영향, 서로 다른 용량을 갖는 차량의 운행시간계획과 환승수요를 고려한 노선망에서의 차량소요대수의 최적배치와 같은 사항은 반영하지 못하였다.

3) 해석적모형(Analytic model)

버스 노선망의 완전한 설계보다는 계략적 설계계수를 결정하기 위한 분석 또는 정책분석을 위한 접근방법이다. 실제 상황에 적용하는데 한계가 있으며, 대중교통시스템을 구성하는 여러 요소간 최적관계(optimal relationships)를 구축하고자 시도된 접근방법이다. 해석적 모형은 주로 개념화된 간단한 가로망을 이용하는데, 이론적으로 매우 정밀하지만 단지 소규모 가로망이나 특정 형태의 가로망에서만 적용되는 한계를 가지고 있다. 그러므로 가로망크기가 이러한 해법의 주요 제약조건이 된다. 따라서 단지 이론적 측면에서만 관심을 끄는 접근방법이라고 할 수 있다. 이러한 접근방법에 의한 연구는 Newell(1979), Kocur and Hendrickson(1982), Tsa and Sconfeld(1984), Kuah(1986)에서 주로 적용한 방법이다.

4) 휴리스틱모형(Heuristic model)

가로망의 크기가 적지 않아서, 최적 버스 노선망의 해 탐색공간이 너무 크거나 완전한 탐색공간을 정의할 적절한 방법이 없는 문제에 사용되는 개략적 접근방법이다. 이 방법은 노선망을 구축하는데 각 단계별로 서로 다른 노선망 구축 법칙을 사용한다. 전역탐색 알고리즘(greedy type algorithm)으로 노선들을 규명하기 위한 휴리스틱 방법(Dubois et al., 1979)과 지선 버스망 설계문제를 위한 다수 기종접간(many-to-many) 통행수요패턴에 적용한 휴리스틱 방법(Kuah, 1986), 그리고 연계환승(coordinated operation)체계의 버스 노선망 설계를 위한 휴리스틱방법(Shih et al., 1998) 등이 여기에 포함된다.

5) 수리모형(Mathematical programming models)

수리모형에 의한 버스 노선망 설계 모형은 매우 큰 연산비용 상의 부담으로 인해, 일부분 휴리스틱한 접근방법이 포함된 부분 최적화 접근방법이라 할 수 있다. 여기에는 Lampkin and Saalman(1967), Mandl(1980), Hasselstrom(1981) 등의 연구가 포함된다. 현실적

용사례를 살펴보면, Hasselstrom(1981)의 연구결과가 볼보대중교통계획패키지(Volvo public transport planning package)에 포함되어 실제 적용된 경우를 제외하고, 다른 연구들은 실제적으로 적용되지 못하였다. 그러나 Hasselstrom(1981)모형은 매우 복잡하고 비 이용자 위주의 적용환경으로 구성되었으며, 요구되는 데이터 양과 비용 그리고 프로세스를 위해 필요한 시간측면에서 매우 비용이 많이 소모되는 단점을 가지고 있다.

5) 하이브리드 모형(Hybrid model)

복잡한 문제를 처리하기 위한 휴리스틱 기법과 그러한 문제에 수반되는 탐색과 최적화기법을 결합시킨 접근방법이다. 최적 노선망 해 탐색공간을 특정후보노선군으로 축소하기 위한 휴리스틱 기법이 적용되고, 최적

노선의 선정을 위해서 하이브리드 속성을 가지는 3단계 수행절차를 제시한 연구(Ceder and Wilson, 1986), 인공지능(AI) 탐색개념과 차량배송문제(Vehicle Routing Problem)를 결합한 인공지능기반 OR연구체계가 버스 노선망 구축에 적용된 연구(Baaj, 1990)등이 이러한 부류에 포함된다. 그러나 이러한 접근방법은 여러 다양한 문제에 적용성이 낮은 단점이 있다. 더구나 이러한 접근방법은 목적함수정보에 대해서 문제특유의 속성을 가지고 있고, 다소 자의적 접근이 가능한 방법일 수 있기 때문에 최적해를 제공하지 못할 수 있다.

2. BTRNDP의 모형구성

BTRNDP는 이용자비용과 운영자비용의 조합인 총 비용을 최소화하는 목적함수를 획득하기 위하여 일련의

〈표 1〉 버스 노선망 설계 문제의 적용모형별 장단점

적용모형	장점	단점	적용
매뉴얼 및 지침 (Manual & guideline)	- 단순함, 비용저렴 - 높은 전문성이 요구되지 않음	- 많은 변수에 대한 가정이 요구됨 - 특정방법에 국한하기 때문에 폭넓은 적용이 어려움	- 적은 도시규모의 소수의 버스노선을 갖는 단순가로망에 적용 - 단기버스노선계획에 적용
시장분석기법 (Market analysis project)	- 체계적이고 단순한 적용 - 비용이 비싸지 않음	- 시스템해석적 모형과 유사함 - 대규모 버스노선망에 적용못함	- 작은 도시지역, 운영계획, 지방도시 및 도시, 지방간 가로망설계에 적용
시스템 해석적모형 (System analytic model)	- 대중교통체계내 구성요소간 최적관계를 정의 하며, 이론적으로 매우 정밀 - 이론적 측면에서만 관심을 끄는 접근방법	- 작은 규모의 가로망이나 특정 형태의 가로망에서만 적용 - 가로망크기가 해법의 주요 제약조건이 됨	- 간략화 또는 정규화된 형태의 가로망을 이용
Heuristic model (step-by-step programming)	- 가로망의 크기가 적지 않을 때 사용되는 개략적 방법	- 단계적 절차로 노선망을 구축하는데 서로 다른 법칙을 사용	- 지선 버스망 설계문제 그리고 연계환승으로 운영되는 버스가로망의 설계 등 현실세계의 대중교통가로망설계에 적용
하이브리드모형 (Hybrid model)	- 복잡한 문제를 다루고 이에 수반되는 휴리스틱기법을 결합시킨 방법 - 목적함수에 문제특유의 속성을 가짐	- 다양한 문제에 적용성이 낮음 - 다소 자의적 접근이 가능한 방법으로 최적해를 제공하지 못할 수 있음	- 인공지능(AI) 탐색개념과 차량배송문제를 결합한 인공지능기반 OR연구체계가 버스 노선망 구축에 적용된 연구
경험기반모형 (Experience-based model)	- 지식기반전문가시스템을 노선망설계에 반영한 방법 - 경험 많은 전문가 지식을 포착하기 위한 시스템	- 지식기반의 전문성을 명확히 표현하는데 어려움. - 시스템 나름의 속성에 기반을 두어 가로망에 대한 이식성이 낮음	- 개발도상국의 도시에서의 대중교통운영에 있어 중요한 방법일 수 있음
시물레이션모형 (Simulation-based model)	- 버스운영에 영향을 주는 많은 변수들간의 복잡한 관계들을 설명할 수 있음	- 노선들간의 상호관계 그리고 노선의 중복에 따른 영향 등은 고려되지 못함	- 주로 개별노선들 또는 작은 규모의 대중교통망에 국한되어 적용
수리최적화모형 (Mathematical optimization model)	- 체계적이고 최적화된 버스시스템 설계가능, 현 버스노선체계에 대해서는 오차가 없음	- 비용이 비싸고, 복잡함, 모든 대안에 대해서 분석, 대규모시스템에 적용불가능	- 중소규모의 도시지역에 적용 - 장기 버스 노선망 계획 - 단순한 버스가로망에 적용

현실적 제약조건 하에서 버스노선집합과 배차횟수를 결정한다. 일반적으로 다음 식과 같이 정의할 수 있다.

$$\text{Maximize/Minimize } f(x, T^{(l)})$$

for all $x \in R$ and $T^{(l)} \subset C_N^{(s_{\min}, s_{\max})}$

Subject to:

(a) Inequality constraints:

$$l_{\min} \leq l \leq l_{\max}$$

$$s_{\min} \leq s_i \leq s_{\max}$$

(b) Equality Constraints:

$$g_i(x, T^{(l)}) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, i_g$$

(c) Other Inequality constraints:

$$p_i(x, T^{(l)}) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, i_p$$

(d) Topology constraints:

$$q_i(n), \quad i = 1, 2, \dots, i_q$$

여기서, $f(x, T^{(l)})$: 버스노선망의 서비스 수준을 나타내는 목적함수

<표 2> 버스노선망 설계문제의 모형 구성요소별 접근방법 분류

Year	Author	Optimization Objective	Design Variables	Solution Approaches	Network hierarchy level	Constraints	Fixed v.s. Variable demand	Transit assignment
1967	Lampkin & Saalmans	Gen. user time	Route & frequency	H&M	1-level	Operating cost	Fixed	Multiple
1974	Silman et al.	Gen. user cost	Route & frequency	H&M	1-level	Operating cost	Fixed	Multiple
1979	Dubois et al.	Gen. user time	Route & frequency	H&M	1-level	Operating cost	Variable	Multiple
1980	Mandl, C.E.	Gen. time	Route	H&M	1-level	Route coverage, directness	Fixed	Single
1981	Hasselstrom, D.	Cost & user benefit	Route & frequency	H&M	1-level	Operating cost	Variable	Multiple
1986	Kuah, G.K.	User & operator cost to access rail station	Feeder Route & frequency	Analytic	1-level (feeder)	Multi-constraints (HG)	Fixed	-
1988	Van Nes et al.	No. of direct trip	Route & frequency	H&M	1-level	Operating cost, fleet size	Variable	Multiple
1990	Baaj, M. H.	Multi-object	Route & frequency	Hybrid AI heuristic	1-level	Multi-constraints (HG)	Fixed	Multiple
1992	Ceder & Israeli	Gen. time & fleet size	Route & frequency	H&M	1-level	-	Fixed	Multiple
1994	Shih & Mahmassani	Multi-object	Route & frequency	Heuristic	1-level	Multi-constraints (HG)	Fixed	Multiple
1996	Ryu, Y.G. (유영근)	User time	Route Network	Heuristic	1-level	-	Fixed	Single
1998	Pattnaik et al.	Gen. time (user & operator)	Route Network	GA	1-level	Frequency, load factor	Fixed	Multiple
1998	Lee, Y.J.	Total operator and user cost	Route & frequency	Heuristic	1-level	Multi-constraints (HG)	Variable	Single
1998	Carrese et al.	Total operator and user cost	Route & frequency	Heuristic	3-level (express/main/feeder)	-	Variable	Multiple
1998	LeBlanc, L.J.	Network total trip-time	Frequency	Math opt.	-	Fleet size	Variable	Multi-modal equilibrium
2002	Bielli et al.	Total operator and user cost	Route shape & headway	GA	1-level	-	Fixed	-
2003	Tom et al.	Total operator and user cost	Route & frequency	GA	1-level	Frequency, load factor	Fixed	Multiple
2003	Zhao, F.	No. of transfer trip	Route & frequency	SA, TS et al	1-level	Multi-constraints (HG)	Fixed	Multiple
2003	Gao et al.	Total operator and user cost	Frequency	Math opt.	-	-	Variable	Multi-modal equilibrium
2004	Fan, W.	Total operator and user cost	Route & frequency	GA, SA, TS et al	1-level	Multi-constraints (HG)	Variable	Multiple

- $T^{(l)}$: l 개의 노선들로 구성된 버스 노선망
- l_{min} : 노선망에서 버스노선의 최소
- l_{max} : 노선망에서 버스노선의 최대수
- s_{min} : 대중교통노선상의 노드(stop)의 최소
- s_{max} : 대중교통노선상의 노드(stop)의 최대수
- $C_N^{(s_{min}, s_{max})}$: 노선망 조합공간

BTRNDP 모형의 제약조건식 (b)와 (c)는 노선직결성(route directness)등과 같이 명시되지 않은 다른 제약조건식을 의미한다. 제약조건식(d)는 대중교통노선이 순환(loop)형이거나 자기자신노선과 교차한다는 것을 제약하는 식을 의미하고 이웃한 버스정류장과 링크로 연결되어야 한다는 것을 제약하는 식이다. 도시가 노선망에서 l 개의 최적대중교통노선들을 찾아내는 문제는 먼저 모든 가능 노선경로를 버스노선망의 해공간상으로부터 나열해서 기본해 탐색공간(basic solution search space)을 정의한다. l 개의 최적대중교통노선들을 찾는 탐색공간은 l 개의 노선경로로 구성된 각각의 유일한 부분집합으로 이루어진 조합적 탐색해공간이 된다. 최적 노선망 설계 문제는 조합적 해공간상의 모든 구성원들을 평가하여 찾게 되며, 최적의 부분집합 하나를 선택하는 문제이다. 이것은 모든 가능해로 구성된 큰 탐색공간으로부터 최적해를 탐색해야하기 때문에 일반적으로 NP-hard라는 특성을 가지고 있다.

1) 목적함수

목적함수는 운행비용최소화(minimizing operating cost), 환승최소화(maximizing transfer saved), 수익최대화(maximizing profit)등의 버스노선운영자의 다양한 요구조건에 따라, 다양하게 버스 노선망 설계문제에 반영될 수 있다. 가장 이상적인 목적함수식은 이용자의 관점뿐만 아니라 운영자의 관점을 모두 고려한 경우이다. 운영자의 주관심사는 운행비용을 최소화하거나 수익을 최대화하는 것이며 이용자는 최소의 통행비용, 통행시간, 대기시간, 환승횟수 등이다. Hasselstrom (1981)은 가변수요를 다루기 위해서 소비자잉여를 극대화하는 목적함수를 이용하였으며, Van Nes et al.

(1988)은 주어진 차량소요대수하에서 직결통행량(direct trips)의 수를 극대화하는 목적함수를 이용하였다. Baaj(1990)는 구축되는 버스노선망으로 기종점간 통행서비스를 제공받는 전체수요(즉, 직결노선수요, 1회 환승수요, 2회 환승수요, 비만족수요)들의 총통행시간과 차내통행시간, 대기시간, 환승시간을 비교 분석하였으며, 버스노선망을 운영하는데 요구되는 차량소요대수와도 비교 분석하였다. Ceder and Israeli(1992)는 일반화 통행비용과 차량소요대수를 최소화하는 다목적함수(multi-objective)를 이용하였다.

2) 수요

기존의 연구방법에서 대부분 수요는 서비스 질과 독립적인 고정수요로 가정하였다. 가변수요는 통행수요모형이 노선망 변화에 대해서 매우 신뢰성을 줄 수 있는 명확한 근거가 부족할 수 있다. 버스 운영자의 관심사는 신규수요의 생성 가능성보다는 기존 승객들이 노선망 변화에 어떠한 변화영향을 받는지에 더 많은 관심을 가진다. 모형 적용상의 단순성 그리고 노선망 설계이후 제안된 노선망에 대한 신규수요에 대한 추정이 가능하기 때문에 노선망 설계단계에서는 고정수요를 이용하는 가정이 더 선호되어 왔다. (Ceder and Wilson,1986)

Dubois et al(1979)은 총 통행수요량에서 대중교통수요 분담율을 추정하기 위해서 평균통행시간에 기반한 전환곡선을 이용하였다. Van Nes et al.(1988)은 통행분포-수단선택 결합모형에 기반한 직접수요모형을 이용하였다. Lee(1998), Fan(2004)는 노선망 설계 문제에 노선망 통행시간변화를 로짓모형으로 추정된 수단분담모형으로 가변수요를 반영하였다.

4) 제약조건(Constraints)

총 운영자비용, 차량소요대수, 서비스 운행횟수 등이 주요 제약조건으로 활용되었다. 총 운영자 비용과 차량소요대수(fleet size)의 제약조건은 운영자비용 산출과 관련해서 대-km, 대-시간과 상관관계가 매우 높기 때문에 제약조건으로 적용할 수 있다. 차량소요대수와 서비스운행횟수 제약조건은 버스노선집합, 노선별 차량소요대수, 배차횟수 등과 관련된 제약조건이다.

5) 해법(Solution methodology)

버스 노선망 설계문제의 해 공간은 조합최적화문제

로서 일반적인 수리최적화문제로 가능해 공간을 정의하는 것은 매우 어렵기 때문에 몇가지 대안적 접근방법을 고려할 수 있다. <그림 3>은 버스 노선망의 해(노선망 구조)에 대한 목적함수값의 관계곡선의 개념도이다. 실제의 경우 곡선은 매우 복잡한 다차원 곡선을 나타낸다. 첫 번째 방법으로 소규모 네트워크의 경우 전수열거방법(all-enumeration method)을 고려할 수 있다. <그림 3>에서 이 방법을 적용시 X축의 모든 해(버스 노선망)에 대해서 목적함수값이 최소값을 갖는 최적 버스 노선망을 찾는다. 이러한 경우 첫 단계는 모든 가능한 노선집합을 생성해야 한다. 10개 노드로 구성된 모의 네트워크에서 노선길이의 제약조건이 없다면 노선집합은 최소 2개 노드에서 최대 10개 노드로 구성되어 생성된다. 노선들은 양방향의 동일한 노선중복을 고려해서 2로 나누어진 노드의 순열(permutation)에 의해서 생성된다. 10개 노드를 가진 네트워크에서 노선의 생성은 다음과 같이 생성된다.

2개의 노드로 구성된 노선수

$$: \frac{10P_2}{2} = \frac{10 \times 9}{2} = 45$$

3개의 노드로 구성된 노선수 :

$$\frac{10P_3}{2} = \frac{10 \times 9 \times 8}{2} = 360$$

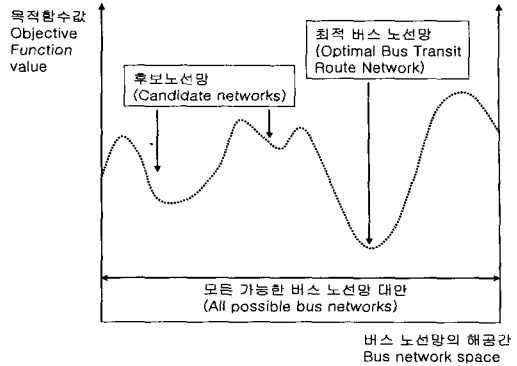
...

10개의 노드로 구성된 노선수

$$: \frac{10P_{10}}{2} = \frac{10!}{2} = 1,814,400$$

총 노선수 = 4,932,045 노선

생성된 노선수는 노선길이의와 노선의 노드수의 제약조건이 적용되면 노선수는 줄어들 것이다. 또한 생성된 노선들은 모든 가능해는 아니다. 생성노선수중 어떤 노선들은 노드간 링크로 연결이 안 되는 노선이 있을 수 있다. 따라서 시행 가능한 노선수는 모의 네트워크의 구조에 따라 결정된다. 제시된 방법은 노선의 모든 가능한 조합으로부터 실제 최적 버스 노선망을 가능해로 제공해 준다. 그러나 너무 많은 연산이 필요하기 때문에



<그림 3> 모형의 해공간

현실의 대규모 노선망에서는 적용에 어려움이 있다.

두 번째 방법은 모든 가능한 후보노선을 생성하기보다는 어떠한 전문가적 노선생성법칙에 따라 후보노선을 생성하는 노선선정방법(route-choosing heuristic)이다. 도출된 노선망 대안간에 최적 버스 노선망을 생성하기 위해서 목적함수값이 비교된다. 만약, 생성된 노선망 대안 노선집합이 좋지 않다면 비록 최적 노선망을 생성하는 질차가 좋더라도 최적 버스 노선망을 도출해 낼 수 없다. 또한 후보노선의 개수와 노선망 대안의 개수가 중요한 파라미터가 될 수 있다. 만약 이러한 개수가 너무 크다면 이 방법은 조합문제에 근접해지거나 전수열거법에 가까워진다. 만약 너무 적다면 좋은 노선과 노선집합을 생성해낼 수 없다. 좋은 후보노선들과 후보노선망을 줄 수 있지만 네트워크 설계지식의 일관성과 일반화가 요구된다.

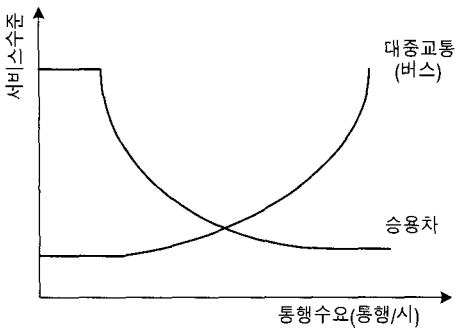
세 번째 방법은 이 방법은 모든 가능한 후보노선집합을 생성하고 노선의 최적조합을 찾기 위해서 Meta-heuristic³⁾알고리즘을 이용하여 전역최적 노선조합을 찾는 노선선정방법이다. 그러나 전수열거방법과 마찬가지로 모든 가능한 후보노선집합을 생성하는데 있어 현실의 대규모 네트워크에 적용 시 마찬가지로 어려움이 있다.

IV. BTRNDP에 적용된 통행배분모형

1. 승용차통행배분과 다른 점

버스 노선망 설계 문제에서 통행배분은 노선의 배차

3) 메타휴리스틱(Meta-Heuristics)은 현실상황에서 대형의 수리최적화 문제들 중에서 많은 문제가 NP-Hard로서 문제크기가 커짐에 따라 컴퓨터의 용량과 계산시간의 한계를 갖는데 이러한 문제의 근사최적해(near optimal solution)를 빠른 시간에 찾을 수 있는 발전적 기법(heuristic)이다. 메타휴리스틱(Meta-Heuristics)의 기법으로는 유전알고리즘(Genetic Algorithm), 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing), 타부서치(Tabu Search)가 있다. 이들 기법들은 개념과 이론이 단순하고 해공간의 탐색능력이 우수하여 공학, 자연과학, 경영학, 사회과학등의 최적화 분야와 의사결정분야에 응용가능하다. [출처: <http://iems.net/kor/literature/biblio/한국과학기술정보연구원구정보센터>]



(그림 4) 승용차, 대중교통의 통행수요와 서비스수준간 관계

횡수를 결정하기 위한 과정이다. 대중교통 노선망에 수요를 배분하기 위해서는 통행 기종점간 이용 가능한 경쟁노선들간에 노선선택을 위한 통행배분 또는 노선선택 법칙이 정의되어야 한다.

수용 가능한 모든 서비스 수준이 항상 유지되고 대중교통용량의 공급이 적정하다고 가정할 경우 수요가 증가함에 따라 대중교통시스템에 의해서 제공되는 서비스수준은 개선될 것으로 예상할 수 있다. 배차시간이 짧을수록 대중교통의 보다 효율적 이용의 가능성을 높일 수 있기 때문에 대중교통에 의해서 제공되는 서비스수준이 향상될 수 있을 것이다. 그러나 승용차 이용자의 서비스수준은 수요가 증가함에 따라 교통 혼잡으로 서비스수준은 감소하게 된다. 승용차 통행에 대해서는 차내 통행시간이 동적인 성격을 갖지만 대중교통 통행에 대해서는 이용자의 대기시간이 배차횟수의 변화에 따라 동적인 값을 가진다. 대중교통 이용자의 노선선택과정은 매우 복잡하다. 정류장에서의 대기시간이 확률적인 상황에서 대중교통이용자들은 통행을 시작하기 전 기종점간의 전체 노선을 미리 선택하는 것이 아니라 통행 중에 적합한 통행노선을 선택할 수도 있기 때문에 대중교통 노선선택에서는 Wardrop's principle이 항상 타당성을 갖는 것은 아닐 수도 있다.

2. BTRNDP를 위한 통행배분모형

대중교통노선망(transit network)은 일반적으로 노드(nodes), 링크(link) 그리고 노선(line)으로 구성된다. 대중교통 노선망 구조(network structure)를 모

델링 하는 방법에 따라 크게 배차횟수기반모형(frequency-based approach)과 스케줄기반모형(schedule-based approach)으로 분류할 수 있다.

대중교통 노선망 설계 문제에 적용된 통행배분모형 연구는 대규모 도시지역의 대중교통 노선망에서 중복노선(overlapping routes)에 따른 문제의 복잡성 때문에 노선선택행태를 비혼잡(uncongestion)상황으로 가정하였으며, 평형배분모형은 적용하지 않고 승용차통행 배분과정을 변형한 다중경로 통행배분모형(multi-path transit assignment)이 주로 활용하였다.

Lampkin and Saalmans(1967)은 배차횟수 배분 법칙(frequency-share rule)에 따라 다수의 경쟁노선에 통행량을 배분하였다. 이 법칙에서 대중교통통행자들은 항상 경쟁노선 중에서 가장 먼저 도착하는 차량에 항상 탑승한다고 가정한다. 결과적으로 노선은 모든 경쟁노선의 배차횟수(frequency)의 합에 대한 해당노선의 배차횟수의 비율과 동일한 통행량비율을 수송하게 된다.⁴⁾

Han and Wilson(1982)은 대중교통이용자의 노선선택의 기준으로 환승 최소화(transfer minimization)를 고려한 사전편집방식(lexicographic decision structure)을 제안하였다. 이 모형에서 주요특징은 환승 횟수를 가장 중요한 기준으로 고려하였고, 이를 고려하기 위해서 환승 횟수에 따라 통행배분이전에 미리 고려하여 환승 횟수 별 통행수요를 분석할 수 있는 통행배분기법을 개발하였다.

이 방법은 기종점 노드 i, j 간 환승 없이 연결되는 모든 대중교통노선경로(transit paths)를 가장 먼저 탐색하고 만약 해당되는 transit paths가 없다면 1-transfer로 연결되는 모든 transit paths를 탐색하게 된다. 주어진 수요노드쌍에 대해서 하나 이상의 경로가 동일한 환승횟수를 가진다면 이들 각각의 경쟁노선에 대한 통행비용을 계산하기 위한 추가적인 법칙이 도입된다. 통행비용이 특정범위수준에 포함되는 경쟁노선에만 각 노선의 상대적 서비스수준을 반영하는 분석적배분모형(analytic allocation model)을 이용하여 통행량을 가로망에 배분하게 된다.

다중경로 통행배분모형에서 통행자의 노선선택기준에 대해서 Horowitz(1987)와 Hasselstrom(1981),

4) 예를 들면 d_{ij} 를 기점 (i)과 종점 (j)간 통행량이라고 가정하고, 만약 3개의 이용 가능한 경쟁노선들 r_1, r_2 그리고 r_3 이 있다면, 그리고 각 노선의 배차횟수를 f_1, f_2 그리고 f_3 이라고 가정한다면, 기종점 ($i-j$)간 노선 r_1 의 모든 링크에 배분되는 통행수요는 $(d_{ij})_{r_1} = f_1 / (\sum_{k=1}^3 f_k) = [f_1 / (f_1 + f_2 + f_3)] * d_{ij}$ 와 같이 계산되고 r_2, r_3 에는 $[f_2 / (f_1 + f_2 + f_3)] * d_{ij}$ 와 $[f_3 / (f_1 + f_2 + f_3)] * d_{ij}$ 를 배분한다. 다시 말해서 대기시간의 확률적 특성을 고려하지 않는다면 통행자들의 평균대기시간은 $w_{ij} = 60.0 / (2 * \sum_{k=1}^3 f_k) = 30.0 / (f_1 + f_2 + f_3)$ 가 된다.

Lee(1998)등은 다음과 같이 지적하였다.

Horowitz(1987)는 통행자들은 환승을 싫어하며 가능한 많은 환승을 회피하고자 항상 노력하며 과도한 보행거리를 싫어함을 지적하였으며 과도한 환승과 보행거리를 갖는 노선은 노선대안으로 고려하지 않는다는 것이다. 만약 그러한 상황이 발생한다면 대중교통이용자들은 좀더 나은 노선을 이용하거나 다른 목적지를 찾게 되며 다른 교통수단을 선택하거나 아예 그들의 통행을 포기할 수도 있다고 지적하였다. Hasselstrom(1981)은 개별 통행자들의 정류장에서 가장 먼저 도착하는 버스와 짧은 통행시간으로 운행하는 빠른 버스 중 어느 것을 이용할 것인가에 대한 대기전략(waiting strategy)에 대해서 연구하였다. 여기서 각각의 버스정류장에서 경쟁노선들 각각의 차내통행시간(in-vehicle time)과 평균대기시간을 고려하여 현재 정류장에서 이용할 수 있는 최소총통행시간(total minimum travel time)과 비교하여 빠른 노선을 선택한다는 것이다.

Lee(1998)는 대중교통 이용자의 대기전략을 정류장에서 발생할 수 있는 경쟁노선들의 통행시간특성 7가지와 그에 따른 이용자들의 선택시나리오 4가지 경우를 설정하여 각각의 시나리오별 노선의 이용비용을 조건부 확률로 계산하는 방법을 제안하였다. 다중경로 대중교통 통행배분은 수용 가능한 대안노선집합을 결정하고, 특정 노선집합과 노선들의 관련 서비스 배차횟수가 미리 주어지고 각 노선의 상대적 장점을 이용하여 수용 가능한 노선들 각각에 통행량을 배분(split)하게 된다.

Baaj and Mahmassani(1990)는 TRUST(Transit Route Analyst)에 Han and Wilson(1982)의 사전 편집방식과 Lampkin and Saalmans(1967)의 배차횟수 배분법칙을 이용하였다. 여기서, 대중교통노선망 설계시 통행배분은 모든 후보노선들 중에서 최단통행시간보다 일정비율 더 긴 통행시간을 갖는 노선 대해서는 제외된다.

Shih and Mahmassani(1994)는 동시환승시스템(timed-transfer transit system)을 TRUST에 반영하기 위해서 확장 연구하였다.

Fan(2004)은 Baaj and Mahmassani(1990)과 Shih and Mahmassani(1994)의 사전편집방식을 그대로 이용하였으며, 기존 연구와 다른 점은 경쟁노선들의 상대적 효율을 기존의 배차횟수 배분법칙 대신 기종점 정류장까지의 도보시간을 포함한 노선별 총통행시간의 역수를 경쟁노선들간 상대적 효율으로 반영하여 통

행량을 배분하였다.

BTRNDP에 다수단 평형배분모형을 적용한 연구는 LeBlanc(1998)와 Gao et al.(2003)에 의해 수행되었으나 버스 노선망 설계보다는 배차횟수(frequency)만을 최적화하는데 적용하였다.

기존 BTRNDP에 적용된 통행배분모형들은 대중교통통행배분모형에 대한 좀더 진전된 연구를 위한 훌륭한 근간을 제공하였다.

V. 결론 및 향후 연구방향

본 연구에서는 버스 노선망 설계문제에 대한 체계화된 방법론을 도출하기 위해서 국내외의 버스노선망 설계방법론에 대해서 고찰하였다.

버스 대중교통은 정해진 노선, 운행시간표에 의해 정류장을 경유하여 운행하므로 버스 노선망 설계 문제(BTRNDP: Bus Transit Route Network Design Problem)는 승용차위주의 가로망 설계 문제와 다른 접근방법이 요구된다. 버스 노선망 설계 문제의 적용모형은 설계방법의 역사적발전과정에 따라 매뉴얼 및 지침, 시장분석기법, 시스템해석모형, 휴리스틱모형, 하이브리드모형, 경험기반모형, 시뮬레이션모형, 수리최적화모형 등 크게 8가지 분류할 수 있다. BTRNDP는 이용자비용과 운영자비용의 조합인 총비용을 최소화하는 목적함수를 획득하기 위한 일련의 현실적 제약조건하에서 버스노선집합과 배차횟수를 결정하는 문제이다. BTRNDP는 조합최적화문제로 일반적 수리최적화문제로 가능해 공간을 정의하는 것이 어렵기 때문에 모든 가능해로 구성된 큰 탐색공간으로부터 최적해를 탐색해야하는 NP-Hard라는 특성을 가진다. BTRNDP의 목적함수는 이용자 및 운영자편을 모두 고려한 다목적함수(Multi-Objective Function)를 이용하며 수요는 고정수요를 이용하였으나 최근에는 가변수요를 고려한 방법론이 연구되고 있다. 해알고리즘으로 최적 버스 노선망을 구성하게 될 모든 가능한 후보노선집합(Candidate Route Set)을 생성하고 노선집합의 최적조합을 찾는 메타휴리스틱(meta-heuristic) 알고리즘을 이용하여 전역최적 노선집합을 찾는 방법이 적용되고 있다. 최적 버스 노선망의 배차횟수를 결정하기 위해서 대중교통 통행배분모형이 필요한데 BTRNDP에 적용되는 통행배분모형은 다중경로 통행배분모형이 주로 활용되었다.

국내의 BTRNDP를 고찰한 결과 향후 연구개발방향

에 대해서 다음과 같이 정리할 수 있다.

첫째, BTRNDP에서 가장 중요한 고려사항은 세분화된 버스정류장 기반 기종점통행량 구축이 필요하다. 가로망 설계 문제에서는 기종점통행량을 행정동기반의 통행량을 이용하였으나 버스 노선망 설계 문제에서는 정류장기반의 보다 세분화된 통행량자료의 구축이 기본적으로 필요하다. 이에 대해서 GIS를 기반으로 한 사회경제지표자료를 이용한 통행량 예측모형의 개발이 가능할 것이며, 최근 버스 정보(BIS) 및 운행관리(BMS) 시스템의 확대 구축과 교통카드(T-Money Card)의 이용 활성화로 정류장기반 통행량 추정을 위한 자료획득 가능하리라 본다.

둘째, 버스 노선망 평가 모형 및 대중교통 통행배분 모형의 개발이 요구된다. 버스 노선망 평가모형은 노선망의 개편 전 후 효과를 분석할 수 있는 평가지표를 획득하기 위한 모형이다. 기존 교통수요추정 및 가로망 분석 상용프로그램인 EMME/2 프로그램의 이용이 가능하지만 보다 세분화된 평가지표자료의 정량화를 위해서 전산화된 평가모형의 개발이 필요하다. 또한 대중교통통행배분모형은 버스 노선망에서 버스이용자들의 통행분석을 위해서 요구되는 모형이라 할 수 있다. 기존의 버스 노선망 설계 문제에 적용된 대중교통통행배분 모형의 연구는 대부분 다중경로통행배분모형을 이용하였으며 여기에는 버스 이용자들의 노선선택기준과 관련하여 현실적이지 못한 가정들이 이용되었다.

셋째, 최적 버스 노선망의 설계를 위한 해 알고리즘의 개선이 요구된다. 버스 노선망의 설계는 조합최적화문제이므로 대부분 접근방법은 최적 버스 노선망을 구성하게 될 후보노선집합을 생성하는 것이 중요한 관건이다. 기존 대부분의 연구에서는 최적버스노선(optimal bus route)이 최단경로(shortest path)상에서만 발생한다는 가정을 이용하여 후보노선집합을 생성하였다. 하지만 최적노선은 최단경로⁵⁾가 아니라 통행거리가 길더라도 보다 많은 대중교통 이용자를 서비스하는 경로가 될 수도 있다는 것이다. 이것은 버스 노선망 설계 문제의 탐색공간(search space)이 최단경로에 의해서 정의되는 공간에 제한을 안 받아야 한다. 또한 기존 국부해 탐색 알고리즘은 전역 최적해를 찾는데 한계가 있으므로 확률적 탐색 알고리즘을 적용한 전역최적탐색알고리즘의 적용이 필요하다.

참고문헌

1. 백혜선(1999), "Set Covering 이론을 이용한 시내버스 최적노선망 구축에 관한 연구", 서울시립대학교 대학원 석사학위 논문.
2. 이상용·박경아(2003), "시내버스노선체계 평가를 위한 정량적 지표의 설정 및 적용", 대한교통학회지, 제21권 제4호, 대한교통학회, pp.29~44.
3. 유영근(1997), "도시버스교통수요예측과 최적노선망 결정방법에 관한 연구", 영남대학교 대학원, 박사학위 논문.
4. 황준환·이성모(2003), "버스노선조정의 효과분석", 제44회 학술발표회 발표논문, 대한교통학회.
5. Baaj, M.H.(1990), "The Transit Network design Problem: An AI-based approach", Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
6. Baaj M.H. and Mahmassani H.S.(1990), "TRUST: A Lisp program for The Analysis of Transit Route Configurations", Transportation Research Record 1283, pp.125~135.
7. Bielli, M., Caramia, M. and P. Carotenuto (2002), "Genetic algorithms in bus network optimization", Transportation Research Part C, Vol 10, pp.19~34.
8. Carrese, S. and S. Gori(1998), "An Urban Bus Network Design Procedure", 6th meeting of the Euro WG on Transportation, Gothenburg, Sweden.
9. Ceder, A. and N.H.M Wilson(1986), "Bus Network Design", Transpn. Res. -B Vol. 20B, No. 4, pp.331~344.
10. Ceder, A. and Y. Israeli(1992). "Scheduling Considerations in Designing Transit Routes at the Network Level". Proceedings 5th International Workshop on Computer-Aided Transit Scheduling, pp.113~136.
11. Ceder, A. and Y. Israeli(1998), "User and Operator Perspectives in Transit Network Design", Transportation Research Record 1623, pp.3~7.

5) 현실적으로 운영되는 버스노선은 최단경로에 기반 한 비용최적화의 관점에서 설명될 수 없는 한계점이 있음. 즉, 공영제나 준공영제를 운영하고 있지 않는 상황에서도 상당액의 보조금이 지불되고 있으며 그에 따라 비용최적화 보다는 이용자 접근편의 위주로 노선이 구성되고 있는 현실에서 최단경로에 기반한 버스 노선망 설계 모형으로 노선망이 구축된다하더라도 현실사용에는 한계가 있을 수 밖에 없음.

12. Ceder, A.(2003), "Public transport timetabling and vehicle scheduling", *Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning*, edited by William H.K. Lam et al Chapter 2. pp.31~58.
13. Chua, T.H. and D.T. Silock(1982), "The Practice of British Bus Operators in Planning Urban Bus Services", *Traffic Engineer and Control*, pp.66~70.
14. Dhingra, S.L, Marwah, B.R. and S.P. Palaniswari (1993), "Simulation Model For Transit Network-Modeling", *Journal of Advanced Transportation*, Vol.27. No.2. pp.181~192.
15. Dubois, D., Bel, G. and M. Libre(1979), "A Set of Methods in Transportation Network Synthesis and Analysis", *Operation Research*. Vol.30. No.9. pp.797~808.
16. Fan, W. et al.(2004), "Optimal Transit Route Network Design Problem", SWUTC /04 /167244-1, Center for Transportation, Bureau of Engineering Research, the University of Texas at Austin.
17. Gao, Z. et al.(2004), "A Continuous equilibrium network design model and algorithm for transit systems", *Transportation Research Part B*. Vol. 38, pp.235~250.
18. Han, A.F. and N.H.M. Wilson(1982), "The Allocation of Buses in Heavily Utilized Networks with Overlapping Routes", *Transpn Res.-B* Vol. 16B, No.3. pp.221~232.
19. Hasselstrom, D.(1981), "Public Transportation planning-A Mathematical Programming Approach", Ph.D. thesis, Department of Business Administration, University of Gothenburg, Sweden.
20. Horowitz, A.J.(1987), "Extensions of stochastic multipath trip assignment to transit networks", *Transportation Research Record* 1108, pp.66~72.
21. Israeli, Y. and A. Ceder(1996), "Public Transportation Assignment with passenger Strategies for Overlapping Route Choice", *In Transportation and Traffic Theory*(13th ISTTT), pp.561~588.
22. Kocur, G. and C. Hendrickson(1982), "Design of local Bus Service with Demand Equilibration" *Transportation Science* Vol.16 No.2 pp.149~170.
23. Kuah, G.K.(1986), "The Feeder Bus Route Design Problem. Ph.D. dissertation. Department of Civil Engineering, University of Maryland, College Park.
24. LeBlanc, L.J.(1988), "Transit System Network Design", *Transportation Research Part B* Vol.22B, No.5 pp.383~390.
25. Lee, Y.J.(1998), "Analysis and Optimization of Transit Network Design with Integrated Routing and Scheduling", Ph.D. Dissertation, University of Pennsylvania.
26. Mandl, C.E.(1980), "Evaluation and Optimization of Transportation Networks", *European Journal of Operational Research*, 5, pp.396~404.
27. Newell, G.F.(1979), "Some Issues Relating to The Optimal Design of Bus Routes", *Transportation Science*, 13(1), pp.20~35.
28. Pattnaik, S. B. et al.(1998), "Urban Bus Transit Route Network Design Using Genetic Algorithm", *Journal of Transportation Engineering*, Vol.124, No.4.
29. Shih, M.C. et al.(1994), "A Design Methodology for Bus Transit Networks with Coordinated Operations", SWUTC /94 /60016-1, Center for Transportation, Bureau of Engineering Research, the University of Texas at Austin.
30. Silman, L.A., Barzily, Z., and U. Passy (1974), "Planning the Route System for Urban Buses", *Computers and Operations Research*. Vol.1. pp.201~211.
31. Tom, V.M. and S. Mohan(2003), "Transit Route Network Design using Frequency Coded Genetic Algorithm". *Journal of Transportation Engineering* , pp.186~195, 3/4.
32. Tsa, S. and P. Sconfeld(1984), "Branched Transit Services: An Analysis" *Journal of Transportation Engineering*. Vol.110 No.1, pp.112~128.

33. Vandebona U. and A.J. Richardson(1985), "Simulation of Transit Route Operation" Transportation Research Record 1036, pp.36~40.
34. Van Nes, R. et al.(1988), "Design of Public Transport Networks", Transportation Research Record 1202, pp.74~83.
35. Zhao, F.(2003), "Optimization of transit Network to minimize transfers",Final Report for BD015-02, Lehman Center for Transportation Research, Department of Civil and Environmental Engineering, Florida International University, Miami, Florida.

✉ 주 작 성 자 : 한종학

✉ 논문투고일 : 2005. 1. 17

논문심사일 : 2005. 5. 11 (1차)

2005. 6. 8 (2차)

심사판정일 : 2005. 6. 8

✉ 반론접수기한 : 2005. 10. 31