

■ 論 文 ■

버스 노선망 설계를 위한 평가모형 개발

Development of Analysis and Evaluation Model
for a Bus Transit Route Network Design

한 종 학

(인천발전연구원 교통물류연구실
연구위원)

이 승 재

(서울시립대학교 교통공학과 교수)

김 종 형

(인천발전연구원 교통물류연구실
연구위원)

목 차

- I. 서론
- II. 기존 연구
- III. 버스 노선망 설계 문제의 정의
- IV. 버스 노선체계 평가모형의 구조
 - 1. 입력자료
 - 2. 출력자료
 - 3. 분석구조
- V. 버스 대중교통 노선선택모형
- VI. 버스 노선망 통행배분모형
 - 1. 직결노선의 통행배분
 - 2. 1회 환승노선의 통행배분
 - 3. 2회 환승노선의 통행배분
 - 4. 3회 이상 환승노선의 경우
 - 5. 차량용량과 배차횟수 설정과정
- VII. 모형의 적용
- VIII. 결론 및 향후 연구방향
- 참고문헌

Key Words : 버스 노선체계 평가모형, 버스 노선망 설계 문제, 입·출력자료구조, 평가지표, 대중교통 노선선택 및 통행배분모형, Mandl Transit Network

요 약

본 연구에서는 버스 노선망 설계 과정에서 다양한 평가지표의 정량적 산출이 가능하고 관련 주체들의 입장과 시각을 반영할 수 있는 버스 노선체계 평가모형(BTRAEM: Bus Transit Route Analysis & Evaluation Model)을 개발하였다. 우리나라 대도시 버스 노선망의 서비스 수준을 평가하고 노선체계를 새롭게 정비하는데 있어 가장 큰 문제점은 평가지표를 정량화 할 수 있는 자료기반의 미흡과 노선망 분석체계 알고리즘의 한계로 계획가의 직관이나 경험에 의존하거나 교통수요분석 프로그램(EMME/2)에 기반하여 평가지표를 산출하여 노선망을 평가하고 있다는 것이다.

이러한 배경 하에서 이 연구에서는 평가모형의 정립을 위해서 국외의 버스 노선망 평가모형의 개발추이를 검토하고, 평가모형에 적용할 버스 노선망 설계 문제의 목적함수와 제약조건을 정의하였다. 또한 평가모형의 구동을 위해서 요구되는 입·출력자료구조와 정량화된 평가지표자료를 구축하였다. 마지막으로 버스 이용자들의 대중교통 노선선택 및 통행배분모형을 평가모형내에 반영하였다.

Visual-C++로 구현된 버스 노선망 평가모형을 Mandl's Transit Network에 적용한 결과, 노선망 구조의 성능을 특징짓는 변수들에 대한 의미있는 결과값이 도출되었다. 향후 이 연구에서 개발된 버스 노선망 평가모형은 다양한 버스 노선망 대안에 대해서 관련 이해당사자들의 입장과 시각을 균형 있게 반영할 수 있고 다양한 목표를 조화시킬 수 있는 평가가 가능하리라 기대된다.

This study is to develop Bus Transit Route Analysis and Evaluation Model that can product the quantitative performance measures for a Bus Transit Route Network Design.

So far, in Korea, there are no so many models that evaluate a variety of other performance measures or service quality that are of concern to both the transit users and operator because of lower-level bus database system and transit route network analysis algorithm's limit.

The BTRAEM in this research differ from the previous approach in that the BTRAEM employs a multiple path transit trip assignment model that explicitly considers the transfer and different travel time after boarding. And we develop input-output data structure and quantitative performance measure for the BTRAEM.

In the numerical experimental applying BTRAEM to Mandl transit network, We got the meaningful results on performance measure of bus transit route network. In the future, we expect BTRAEM to give a good solution in real transit network.

I. 서론

버스 노선체계 평가모형(Bus Transit Route Analysis & Evaluation Model : BTRAEM)은 시행 가능한 다수의 노선망 설계 대안을 이용자비용(버스가 이용자가 경험하는 비용)과 운전자비용(차량소요대수) 등 노선망의 서비스수준을 반영하는 많은 실적지표를 통해서 버스 노선망 대안을 평가하는 일련의 과정을 의미한다.

신도시에 새로운 버스 노선체계를 구축하거나 기존 도시 가로망의 버스 노선망을 개편하기 위해서는 후보 노선망이나 기존 노선에 대한 합리적이고 형평성 있는 평가가 이루어져야 한다. 합리적 평가가 이루어지기 위해서는 가능한 한 객관적이고 정량적인 평가기준 및 지표를 기반으로 버스노선을 둘러싼 관련주체들의 입장과 시각을 균형 있게 반영할 수 있고 다양한 목표를 조화시킬 수 있는 평가모형의 정립이 중요한 연구과제라 할 수 있다.

인천시를 비롯한 우리나라 대도시의 버스 노선망의 서비스 수준을 평가하고 노선체계를 새롭게 정비하는데 있어 가장 큰 문제점이 노선망 평가지표를 정량화 할 수 있는 자료기반의 미흡과 노선망 분석체계 알고리즘의 한계로 계획가의 직관이나 경험에 의존하거나 기존 교통수요 분석프로그램(EMME/2)에 기반하여 평가지표를 산출하여 노선망을 평가하고 있다는 것이다. 따라서 다양한 평가지표의 정량적 산출이 가능하고 관련주체들의 입장과 시각이 반영된 노선망 대안 평가모형의 개발이 요구된다.

본 연구는 이러한 배경 하에서 버스 노선체계 평가모형을 개발하였다. 평가모형의 정립을 위해서 먼저 국외의 버스 노선망 평가모형의 개발 추이를 살펴보고, 평가모형에 적용할 버스 노선망 설계 모형의 목적함수와 제약조건을 정의하였다. 또한 평가모형의 구동을 위해서 요구되는 입력자료와 작동 결과 도출되는 출력자료와 평가지표자료를 정의하였다. 마지막으로 평가모형의 중요한 기능을 수행하는 통행자들의 노선선택과 통행량배분 법칙을 기반으로 한 대중교통 통행배분모형에 대해서 검토하였다.

II. 기존 연구

버스 노선망 설계 문제(BTRNDP : Bus Transit

Route Network Design Problem)는 시스템 성능과 자원의 제약조건 하에서 목적함수의 최대(최소)화를 달성하기 위하여 노선집합과 노선배차횟수로 구성된 버스 노선망 구조를 결정하는 문제이다. 버스 노선망 설계 문제의 가장 핵심적인 구성요소는 수리모형식으로 표현된 목적함수와 운영자의 관심사인 노선망의 효과성 및 서비스수준 실적지표를 평가하는 과정이라 할 수 있다. 이러한 평가를 위해서는 평가대상이 되는 특정 버스 노선망 구조를 정의하는 노선집합에 대중교통 통행수요의 통행배분이 평가모형에서 중요한 위치를 갖는다.

Spieß and Florian(1989)은 대중교통통행배분모형에 관한 연구를 크게 2가지로 분류하였는데, 별도의 문제로 분리하여 연구된 대중교통통행배분모형¹⁾(e.g. Decea and Fernandez,1993; 윤혁렬, 2000; 이신해,2002)과 대중교통 노선망 설계 문제²⁾(e.g. Baaj, 1995; Shih and Mahmassani,1996; Y.J.Lee, 1998; WeiFan,2004) 또는 다수단 노선망 평형배분모형³⁾(e.g. LeBlanc,1988)의 하부문제(subproblem)로 대중교통통행배분모형을 구분하였다.

버스 노선체계 평가를 위한 국외에서 개발된 컴퓨터 프로그램으로는 TRUST(Baaj, 1995), NETAP(Shih et al.,1994), TRANED(V.J.Lee,1998) 등이 있으며 언급한 대중교통통행배분모형들 중 하나에 기반을 두고 많은 대중교통운영기관이나 정부기관에서 사용하고 있다.

본 연구에서는 다중경로 통행배분문제의 대표적모형인 Spiess and Florian(1989)이 제시한 최적전략(Optimal strategy)에 의한 통행배분모형에서 고려하지 못한 환승횟수를 최소화하는 기종점간 최소통행시간 노선집합들간의 대중교통 이용자 속성을 평가모형에 반영하였다. 또한 정량적 평가지표와 평가과정을 새롭게 평가모형에 반영하였다.

III. 버스 노선망 설계 문제의 정의

버스노선체계 개편에 따른 노선망 평가기준으로 다양한 정량적 지표들이 이용될 수 있으나 가장 합리적인 평가기준으로 적용할 목적함수의 정립이 필수적이다. 버스 노선체계 평가 모형의 목적함수 식(1)은 버스 노선

1,2,3) 대중교통 통행배분모형은 단일경로통행배분모형,다중경로통행배분모형,균형통행배분모형으로 구분할 수 있는데, 버스노선망설계모형에서 주로 이용된 모형은 다중경로통행배분모형이며, 나머지 모형은 노선망설계문제와 분리하여 연구된 모형인.

망의 이용자, 운영자, 그리고 평가 대상 노선망으로 서비스를 제공받지 못한 대중교통 의존 통행자(Unsatisfied Captive rider)들의 통행량으로 구성된다. 여기서, 식(1)의 첫 번째 항목은 직결통행수요시간 ($d_{ij}^{r_s} \cdot t_{ij}^{r_s}$)와 환승통행수요시간($d_{ij}^{tr} \cdot t_{ij}^{tr}$)의 합으로 이용자 비용항목을 의미한다. 두 번째 항목은 노선의 운행횟수(f_k)와 왕복통행시간(t_k)으로 계산된 운영자 비용항목을 의미한다. 세 번째 항목은 직결노선과 환승경로 노선으로 서비스를 제공받지 못하는 기종점통행량을 의미한다. c_1, c_2, c_3 는 버스 노선망 설계 목적함수의 다목적함수(multi-objective)의 특성을 나타내는 가중치를 의미하며, 이 값은 통행시간 및 운행시간의 시간가치와 이용자비용, 운영자 비용, 비만족 통행수요간의 민감도분석을 통해서 가중치를 결정하게 된다.

버스노선체계 개편 시 적용되는 설계변수의 제약조건식으로 5개를 고려할 수 있다. 식(2)는 배차횟수의 최대·최소값에 대한 제약조건식이다. 식(3)은 부하계수(Load factor)와 관련된 사항이다. 부하계수는 배차횟수에 영향을 미치며 배차횟수는 수요와 차량크기(Vehicle size)에 의해 영향을 받는다. 부하계수(LF)는 버스 운영자가 운행버스의 서비스유형과 서비스지역 특성, 기타 특별한 사항을 고려해 최대·소 값을 정의할 수 있다. 식(4)는 노선 k 의 왕복운행시간(t_k)을 노선 k 의 배차시간으로 나눈 값은 노선 k 의 소요차량대수를 의미하는데 이 값이 버스 운영기관의 현재 이용 가능한 버스보유대수(W)를 초과할 수 없다는 자원제약조건을 반영하는 식이다. 식(5)은 노선연장이 매우 긴 버스 노선의 경우 배차시간을 유지시키기 어렵기 때문에 버스 노선연장의 최대·소 값에 대한 제약조건식이다. 식(6)는 차량소요대수와 관련성이 있는 최대 버스 노선수와 관련된 제약조건식이다. 이후 버스 차량기사의 배치계획에 큰 영향을 미친다.

$$\begin{aligned} \text{Min. } Z = & \quad (1) \\ & c_1 \left[\sum_{i,j \in N} \sum_{r_s \in DR_o} d_{ij}^{r_s} \cdot t_{ij}^{r_s} + \sum_{i,j \in N} \sum_{tr \in TR_o} d_{ij}^{tr} \cdot t_{ij}^{tr} \right] \\ & + c_2 \left[\sum_{k=1}^M f_k \cdot t_k \right] \\ & + c_3 \left[\sum_{i,j \in N} d_{ij} - \sum_{i,j \in N} \sum_{r_s \in DR_o} d_{ij}^{r_s} - \sum_{i,j \in N} \sum_{tr \in TR_o} d_{ij}^{tr} \right] \end{aligned}$$

subject to⁴⁾

$$f_{\min} \leq f_k \leq f_{\max} \quad \forall r_k \in R_{RS} \quad \text{: 운행횟수} \quad (2)$$

$$l_k \leq l_{\max} \quad \forall r_k \in R_{RS} \quad \text{: 부하계수} \quad (3)$$

$$\frac{t_k}{h_k} \leq W \quad \forall r_k \in R_{RS} \quad \text{: 차량소요대수} \quad (4)$$

$$D_{\min} \leq D_k \leq D_{\max} \quad \forall r_k \in R_{RS} \quad \text{: 노선연장} \quad (5)$$

$$M \leq R_{\max} \quad \text{: 노선수} \quad (6)$$

여기서,

i, j : 노드(정류장노드) ($i, j \in N$)

r_k : 노선($r_k \in R_{RS}$)

tr : 하나 이상의 노선을 이용하는 환승경로 ($tr \subset R_{RS}$)

R_{\max} : 노선망에서의 최대 허용버스노선수

N : 노선망에서의 노드(정류장노드) 개수

D_{\max} : 노선의 최대편도운행거리

D_{\min} : 노선의 최소편도운행거리

d_{ij} : 노드 i 에서 j 까지 통행수요

f_{\max} : 임의 노선 운행버스의 최대배차횟수

f_{\min} : 임의 노선 운행버스의 최소배차횟수

l_{\max} : 최대허용부하계수

W : 버스 운영기관의 현재 이용 가능한 버스 보유대수

c_1 : 이용자통행시간의 이용자비용 환산 계수

c_2 : 버스차량의 대-거리의 비용 환산 계수

c_3 : 비만족수요의 통행시간 손실비용 환산계수

M : 제안된 노선망의 버스 노선수

r_k : 해 노선망의 노선집합 중 k 번째 노선

D_k : 노선 k 의 편도운행거리

$d_{ij}^{r_s}$: 노선 k 에 의한 노드 i, j 간 통행수요

d_{ij}^{tr} : 환승에 의한 노드 i, j 간 통행수요

$t_{ij}^{r_s}$: 노선 k 에 의한 노드 i, j 간 통행시간

t_{ij}^{tr} : 환승경로노선에 의한 노드 i, j 간 통행시간

l_k : 노선 k 부하계수

t_k : 노선 k 왕복통행시간

h_k : 노선 k 배차시간

4) 운행횟수(2), 부하계수(3), 차량소요대수(4), 노선연장(5), 노선수(6)에 대한 최대, 최소값의 범위는 사용자정의계수로 나타낼 수 있으며, 이 값은 네트워크, 통행수요패턴에 대한 계획가 및 연구자의 직관과 이해정도에 따라 결정되는 값임.

- f_k : 노선 k 운행횟수
- R_{RS} : 해가 되는 노선망을 구성하는 노선집합
- Q_k^{max} : 노선 k 의 최대부하구간의 승객통행량

N. 버스 노선체계 평가모형의 구조

버스 노선체계 평가모형은 버스 노선망 설계를 지원할 수 있는 분석도구라고 할 수 있다. <그림 1>에서 보는 바와 같이 대중교통 계획가는 컴퓨터 프로그램으로 작성된 노선망 대안 생성 프로그램을 이용하여 후보노선집합(Candidate route set)을 도출한다. 후보노선집합, 노선별 배차횟수, 버스 기종점통행량, 기타 사용자 정의 계수를 입력자료로 이용하여 BTRAEM은 목적함수의 구성요소를 포함한 다양한 노선망 실적지표수치(Performance measure)를 산출한다. 일반적인 비용항목 뿐만 아니라 버스 이용자 관점에서 특히 환승과 관련된 노선망의 서비스수준의 실적지표수치를 생성한다. 버스노선체계 평가모형은 <표 1>와 같은 6가지 유형의 노선망 실적지표 정보를 산출하게 된다. 따라서

<표 1> 버스 노선체계 평가모형의 출력자료

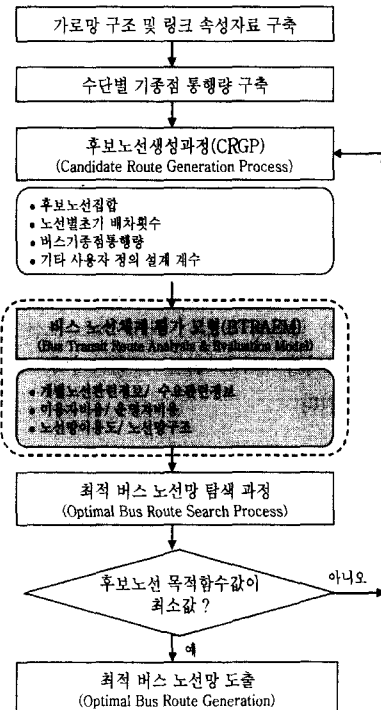
버스 노선망 성능 지표	
● 개별 노선관련 정보(Route information)	
노선망 및 노선 형상(Network configuration or route configurations)	노선들의 배차횟수(Frequencies of routes.(vehicle/h))
● 수요관련 정보 (Demand information)	
노선망 전체 수요(Network Total Demand)	직결노선 수요(Demand Satisfied without transfer(Demand, Percentage))
	1회 환승 수요(Demand Satisfied with 1 Transfer(Demand, Percentage))
	2회 환승 수요(Demand Satisfied with 2 Transfer(Demand, Percentage))
	비만족 수요(Unsatisfied Demand(Demand, Percentage))
● 이용자 비용(User Cost)	
노선망 총 통행시간(Network Total Travel Time)	노선망 총 차내통행시간(In-Vehicle Travel Time(person-minutes/h))
	노선망 총 대기시간(Network Total Waiting Travel Time of Route k)
	노선망 총 환승시간(Network Total Transfer Time(prs-min/h))
	노선망 총 환승패널티(Network Total Transfer Penalty(prs-min/h))
● 운영 비용(Operating Cost)	
노선수(Number of Routes)	노선망 총 운행노선연장(Network Total Operating Length)
	노선망 총 운행시간(Network Total Operating Time)
	노선 k 의 운행연장(Operating Trip Length of Route k)
	노선 k 의 운행시간(Operating Trip Time of Route k)
	노선 k 의 필요차량소요대수(Required Fleet Size of Route k)
● 노선망 이용도(System Utilization)	
실제 이용자 총 통행거리(Total Actual User trip length(km))	최대 이용자 통행거리(Maximum User Trip Length(km))
● 노선망 구조	
우회도(Degree of Circuity(DOC),(%)	

다수의 후보노선집합에 대해서 실적지표 자료를 정책적으로 비교하거나 목적함수의 구성요소 조합값을 최소화하는 후보노선집합을 최적 버스 노선망으로 확정하게 된다.

1. 입력자료

<그림 1>에서 보는 바와 같이 BTRAEP를 위해서 필요한 입력자료는 순차적 버스 노선망 설계과정에서 BTRAEM이전에 생성된 자료가 되는데 크게 4가지로 분류할 수 있다. 후보 노선망, 노선운행횟수, 기종점 통행수요, 기타 설계계수 등이 해당된다.

- Bus Network & Route Information : 버스 노선망을 구성하는 정류장노드 집합, 버스 노선망을 구성하는 버스노선번호(이름), 노선을 구성하는 정류장노드 연결리스트, 정류장간 통행시간(거리), 정류장노드-노선구간 연결리스트
- Frequency : 각 노선의 서비스 배차횟수 초기값
- Demand Data : 수단별 기종점통행량, 버스정류장기반 기종점 버스통행량
- Design Parameter : 버스 노선망 설계자에 의해서 정의되는 계수값으로 환승에 따른 환승 패널티, 버스좌석용량(Vehicle size), 각 노선의 최대부하계수(Max. Load Factor), 운영자·이용자·노선망 서비스 비수요자(Unsatisfied demand) 비용에 대한 각각의 상대적 가중치, 최대·최소 버스 노선수 등



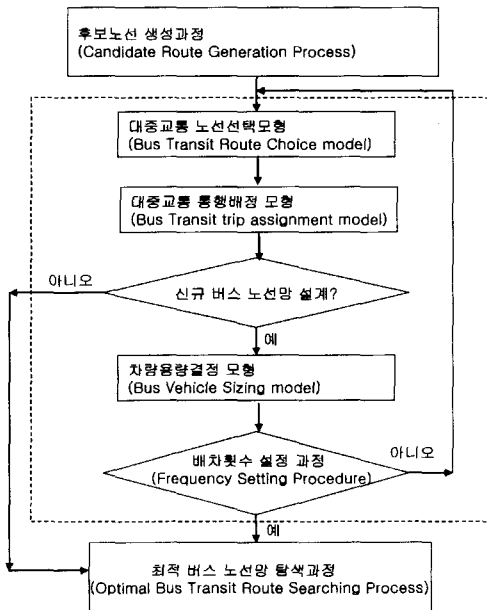
<그림 1> 버스 노선망 설계과정에서 평가모형의 위상

2. 출력자료

BTRAEM는 크게 6가지 유형의 노선망 실적지표수치를 생성한다. 개별노선관련정보, 수요관련정보, 이용자비용관련 정보, 운영자비용관련 정보, 노선망 이용도, 노선망 구조 등의 출력자료를 얻게 된다. BTRAEM 출력자료는 노선망의 성능을 평가하기 위한 다양한 평가지표를 정량화할 수 있는 기초자료를 제공하게 된다.

3. 분석구조

BTRAEM의 분석구조는 버스노선 통행배분원칙에 따라 통행량이 배분되고 각 노선의 서비스 배차횟수가 결정되며 배차횟수의 수렴여부에 따라 버스통행배분(Bus transit trip assignment), 버스차량크기결정, 배차횟수 설정과정(Frequency setting procedure)의 반복수행여부가 결정된다. 반복과정에서 전후의 배차횟수가 사용자정의계수에 의해 설정된 오차범위보다 크다면 노선배차횟수의 수렴(consistency)이 이루어질 때까지 반복한다. 노선 배차횟수의 수렴이 이루어지면 노선배차횟수와 노선망 실적지표(System performance



〈그림 2〉 버스 노선망 평가모형의 분석구조

measure)가 얻어진다.

BTRAEM은 다음과 같은 가정 하에서 구현된다.

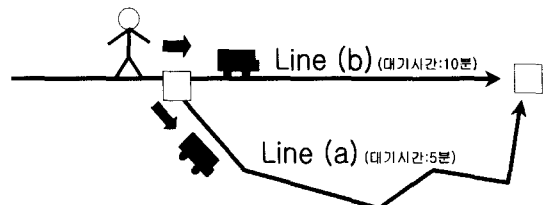
첫째⁵⁾, 기종점간 버스이용승객의 통행시간과 관련된 모든 요소는 혼잡의 영향을 고려하지 않는다. 가로상의 링크통행시간(차내통행시간)은 일반차량의 교통혼잡에 따른 통행시간변화를 고려하지 않고 초기의 고정값으로 사용한다. 둘째, 기종점 통행량은 버스 노선망 구조의 네트워크영향을 반영한 버스통행량의 가변수요를 고려하지 않고 승용차, 택시, 버스, 지하철 수단을 모두 합한 총 수단통행량의 전체 고정수요를 이용하여 분석한다. 셋째, 승객들은 균일분포로 무작위로 도착하며, 운행버스의 통행시간정보를 제공받는다. 차량들은 균일한 배차시간으로 도착한다. 버스노선 이용자의 평균대기시간은 노선배차간격의 1/2이다.

V. 버스 대중교통 노선선택 모형

대중교통 노선선택 모형에서는 버스 이용자들이 환승횟수를 최소화하는 기종점간 버스 노선을 우선하여 선택하며, 배차시간이 짧아 가장 먼저 도착하더라도 탑승후 통행시간이 최소인 노선을 우선하여 선택한다.

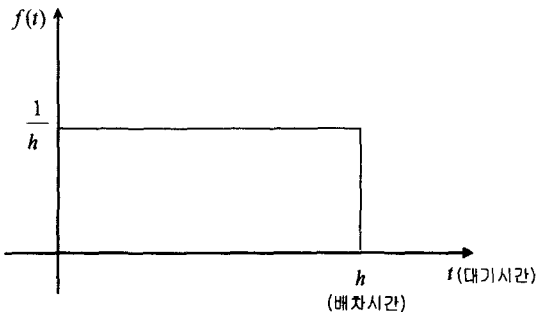
〈그림 3〉과 같이 버스 이용자가 정류장에서 목적지까지 운행하는 2개의 노선을 이용할 수 있다고 한다면 임의 노선버스가 도착하였을 때 탑승후 통행시간이 다른 노선의 대기시간과 탑승후 통행시간의 합보다 적은 노선일 경우에 도착한 노선에 탑승한다. 반대로 임의의 노선이 도착하였을 때 그 노선을 선택하지 않고 다른 노선을 선택한다는 것은 도착한 노선을 탑승한 이후 통행시간이 다른 노선을 기다렸다가 탑승하는 노선의 통행시간보다 크기 때문이다.

승용차위주의 노선선택모형과 달리 버스 대중교통 통행시간의 다양한 구성요소 때문에 이용자의 노선선택은



〈그림 3〉 정류장에서의 버스 노선선택개념

5) 버스노선망설계에서 혼잡에 대한 고려사항은 대중교통 통행배분모형과 직결되는 사항으로 이 부분에 대한 연구는 대부분 auto assignment의 가정을 적용하고 있으나 대중교통혼잡에 따른 영향을 제대로 반영한다고 볼 수 없음. 이에 대한 검토는 본 연구의 범위에서 가정사항을 제시하였음. 또한 버스노선망설계문제에 적용된 다중경로 통행배분모형에서는 일반적으로 수용되는 가정사항임.



(그림 4) 버스 노선 대기시간의 확률분포

대기시간, 탑승후 통행시간, 그리고 이들 두 시간요소를 합한 총통행시간으로 결정된다. 이용자들의 노선선택이 정류장에서 이루어질 경우 대기시간은 확률변수가 되고 탑승후 통행시간은 확정적 변수가 된다. 대기시간이 확률변수이기 때문에 노선선택은 확률문제가 된다.

버스 차량들이 정해진 배차시간에 따라 일정하게 도착하고 버스이용자들이 무작위로 정류장에 도착한다면 이용자들의 버스 이용확률은 모든 이용자들에게 동일한 균일분포를 갖는다. 여기서 확률변수는 승차하고자 하는 버스의 대기시간이며 정류장에 도착하는 이용자들은 모두 동일하게 배차시간 중 어느 한 시점에 탑승할 것이라는 기대를 할 것이다. 이때 버스이용자들의 대기시간의 평균값은 버스배차시간의 1/2이 된다.

통행량배분은 common line problem에서 일반적으로 적용되는 배차횟수 배분원칙(frequency share rule)과 탑승후 통행시간의 차이에 의한 통행배분원칙을 기반으로 수행된다. 통행배분노선은 후보노선으로 선정된 노선을 최대 3개 노선까지만 고려한다. 여기서, 첫 번째로 배차횟수 배분원칙에 의한 노선선택확률은 다음과 같이 배차횟수의 비례하는 만큼 통행량을 배분하게 된다. 노선(1), 노선(2), 노선(3)이 각각 첫 번째로 도착해서 선택할 확률은 다음과 같다.

$$P_1 = \frac{f_1}{f_1 + f_2 + f_3} = \frac{t_w^2 t_w^3}{t_w^2 t_w^3 + t_w^1 t_w^3 + t_w^1 t_w^2} \quad (7)$$

$$P_2 = \frac{f_2}{f_1 + f_2 + f_3} = \frac{t_w^1 t_w^3}{t_w^2 t_w^3 + t_w^1 t_w^3 + t_w^1 t_w^2} \quad (8)$$

$$P_3 = \frac{f_3}{f_1 + f_2 + f_3} = \frac{t_w^1 t_w^2}{t_w^2 t_w^3 + t_w^1 t_w^3 + t_w^1 t_w^2} \quad (9)$$

여기서,

f_1, f_2, f_3 : 노선1,2,3의 운행횟수

t_w^1, t_w^2, t_w^3 : 노선1,2,3의 평균대기시간

$f = \frac{1}{h} = \frac{1}{2t_w}$: 운행횟수는 배차시간의 역수관계이며, 평균대기시간은 배차시간의 1/2 값으로 가정함.

두 번째로 탑승후 통행시간의 차이에 의한 통행배분 법칙은 탑승 후 통행시간이 적은 노선의 추가 대기시간의 확률변수의 분포를 다음과 같이 확률밀도함수(pdf)와 누적확률함수(cdf)로 정의하여 조건부확률식으로 통행배분비율을 정의할 수 있다.

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{h_b} = \frac{1}{2t_w^b} & (0 \leq t \leq t_i^a - t_i^b) \\ 0 & (t > t_i^a - t_i^b) \end{cases} \quad (10)$$

$$F(t) = \begin{cases} \frac{t_i^a - t_i^b}{h_b} = \frac{t_i^a - t_i^b}{2t_w^b} & (0 \leq t \leq t_i^a - t_i^b) \\ 0 & (t > t_i^a - t_i^b) \end{cases} \quad (11)$$

여기서,

$f(t)$: b노선 대기시간의 확률분포

$F(t)$: b노선 대기시간의 누적확률분포

h_b : b노선의 배차시간

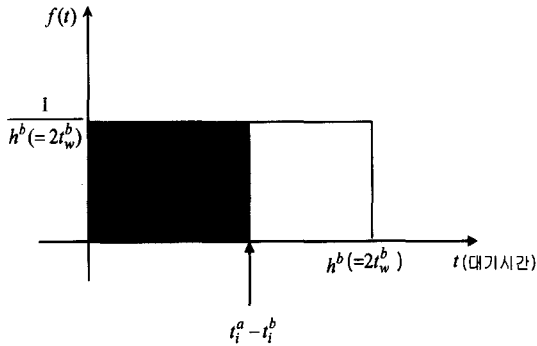
t_w^b : b노선의 평균대기시간

t_i^a : a노선의 탑승후 통행시간

t_i^b : b노선의 탑승후 통행시간

$\frac{t_i^a - t_i^b}{h_b} = \frac{t_i^a - t_i^b}{2t_w^b}$: a노선과 b노선의 대기시간과 탑승후 통행시간의 관계가 $t_i^b + h_b < t_i^a$ 와 같이 b노선의 탑승후 통행시간과 b노선의 최대대기시간(배차시간)의 합이 a노선의 탑승후 통행시간보다 적을 경우 a노선이 먼저 도착하더라도 b노선을 대기하여 탑승한다는 의미임.

여기서, 노선(a)의 버스가 정류장에 도착하더라도 노선(b)의 버스를 기다릴 확률은 (그림 5)와 같이 노선(b)의 추가 대기시간이 노선(a) 탑승후 통행시간에서 노선(b)의 탑승후 통행시간을 뺀 시간보다 적을 확률을 구하면 된다. 후보노선이 2개인 경우 노선(a)와 노선(b)의 노선선택확률은 다음과 같다.



〈그림 5〉 버스 노선 선택확률의 계산

$$P_a = \frac{t_w^b}{t_w^a + t_w^b} + \left(\frac{t_w^a}{t_w^a + t_w^b} \cdot \frac{t_i^b - t_i^a}{2t_w^a} \right) - \left(\frac{t_w^b}{t_w^a + t_w^b} \cdot \frac{t_i^a - t_i^b}{2t_w^b} \right) \quad (12)$$

$$P_b = \frac{t_w^a}{t_w^a + t_w^b} + \left(\frac{t_w^b}{t_w^a + t_w^b} \cdot \frac{t_i^a - t_i^b}{2t_w^b} \right) - \left(\frac{t_w^a}{t_w^a + t_w^b} \cdot \frac{t_i^b - t_i^a}{2t_w^a} \right) \quad (13)$$

후보노선이 3개인 경우 각 노선의 선택확률을 다음과 같다.

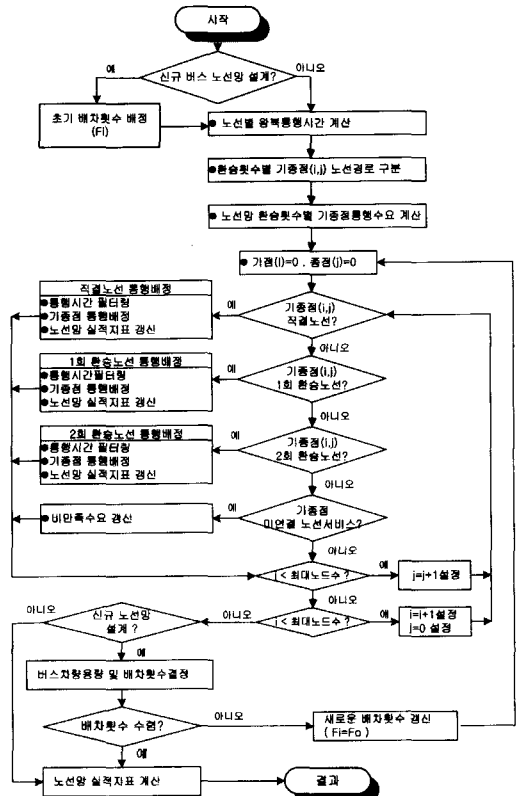
$$P_a = \frac{t_w^b t_w^c}{t_w^b t_w^c + t_w^a t_w^c + t_w^a t_w^b} + \left(\frac{t_w^a t_w^c}{t_w^b t_w^c + t_w^a t_w^c + t_w^a t_w^b} \cdot \frac{t_i^b - t_i^a}{2t_w^a} \right) + \left(\frac{t_w^a t_w^b}{t_w^b t_w^c + t_w^a t_w^c + t_w^a t_w^b} \cdot \frac{t_i^c - t_i^a}{2t_w^a} \right) - \left(\frac{t_w^b t_w^c}{t_w^b t_w^c + t_w^a t_w^c + t_w^a t_w^b} \cdot \frac{t_i^a - t_i^b}{2t_w^b} \right) - \left(\frac{t_w^b t_w^c}{t_w^b t_w^c + t_w^a t_w^c + t_w^a t_w^b} \cdot \frac{t_i^a - t_i^c}{2t_w^c} \right) \quad (14)$$

$$P_b = \frac{t_w^a t_w^c}{t_w^b t_w^c + t_w^a t_w^c + t_w^a t_w^b} + \left(\frac{t_w^b t_w^c}{t_w^b t_w^c + t_w^a t_w^c + t_w^a t_w^b} \cdot \frac{t_i^a - t_i^b}{2t_w^b} \right) + \left(\frac{t_w^a t_w^b}{t_w^b t_w^c + t_w^a t_w^c + t_w^a t_w^b} \cdot \frac{t_i^c - t_i^b}{2t_w^b} \right) - \left(\frac{t_w^b t_w^c}{t_w^b t_w^c + t_w^a t_w^c + t_w^a t_w^b} \cdot \frac{t_i^b - t_i^c}{2t_w^c} \right) - \left(\frac{t_w^a t_w^b}{t_w^b t_w^c + t_w^a t_w^c + t_w^a t_w^b} \cdot \frac{t_i^b - t_i^a}{2t_w^a} \right) \quad (15)$$

$$P_c = \frac{t_w^a t_w^b}{t_w^b t_w^c + t_w^a t_w^c + t_w^a t_w^b} + \left(\frac{t_w^b t_w^c}{t_w^b t_w^c + t_w^a t_w^c + t_w^a t_w^b} \cdot \frac{t_i^a - t_i^c}{2t_w^c} \right) + \left(\frac{t_w^a t_w^b}{t_w^b t_w^c + t_w^a t_w^c + t_w^a t_w^b} \cdot \frac{t_i^b - t_i^c}{2t_w^c} \right) - \left(\frac{t_w^a t_w^b}{t_w^b t_w^c + t_w^a t_w^c + t_w^a t_w^b} \cdot \frac{t_i^c - t_i^a}{2t_w^a} \right) - \left(\frac{t_w^a t_w^b}{t_w^b t_w^c + t_w^a t_w^c + t_w^a t_w^b} \cdot \frac{t_i^c - t_i^b}{2t_w^b} \right) \quad (16)$$

V. 버스 노선망 통행배분 모형

버스 노선망 통행배분모형은 통행 기종점간 환승 횟수에 따라 0-transfer, 1-transfer, 2-transfer, 또는 Unsatisfied로 구분하고 기종점간 통행수요(d_{ij})를 위계적(hierarchical) 관점에서 환승횟수를 최소화하는 기종점간 노선경로를 통행배분 후보노선을 도출하고 통행시간검사법칙(travel cost check rule)에 따라 후보



〈그림 6〉 버스 노선망 통행배분 과정

노선 중에서 최소통행시간경로를 갖는 3개의 후보노선을 통행배분 대상노선으로 선정한다. 선정된 후보노선의 운행횟수(대기시간)와 탑승후 통행시간에 따라 노선선택 확률이 계산되며 통행배분이 수행된다. <그림 6>은 버스 노선망 통행배분모형의 전체 흐름도를 나타낸다.

1. 직결노선의 통행배분

주어진 기종점 노드(i, j)에 대해서 통행배분모형은 기점노드 i 와 종점노드 j 를 경유하는 2개의 노선집합 RS_i 와 RS_j 의 교집합을 체크한다.

$RS_i \cap RS_j \neq \emptyset$ 이면 노드 i 와 노드 j 를 모두 포함하는 노선들이 생성된다. 이 노선들은 노드(i, j)의 직결노선으로 분류한다. $RS_i \cap RS_j = \emptyset$ 이거나 RS_i 와 RS_j 의 두 집합 중 하나가 공집합이라면 노드(i, j)를 직결하는 노선은 없으므로 버스 이용자들은 환승경로 노선을 고려해야 한다.

$r_k \in RS_i \cap RS_j$ 를 만족하는 다수의 직결노선이 있다면 통행시간 검사법칙과 각 노선의 통행시간 특성에 따라 통행배분 후보노선을 선정하고 각 노선경로에 통행량을 배분한다. <그림 7>는 직결노선 수요쌍을 갖는 후보노선집합의 생성과정을 설명한 것이며, 기점노드(i)에서 종점노드(j)까지 노선 r_k 를 운행하는 버스차량으로 통행하는 대중교통이용자의 총통행시간을 TT_{kij} 라고 정의한다.

$$TT_{kij} = t_{i,k}^{wait} + t_{i,k,j}^{invt} \quad (17)$$

여기서,

$t_{i,k}^{wait}$: 노선 r_k 의 기점노드(i)에서 대기시간



<그림 7> 직결서비스에 의한 후보노선생성

$t_{i,k,j}^{invt}$: 노선 r_k 의 기종점(i, j)간 차내 통행시간

2. 1회 환승노선의 통행배분

직결노선이 없는 경우 1회 환승 노선을 탐색한다. 노선 r_{n1} 과 r_{n2} 을 체크하면서 NLS_{n1} 과 NLS_{n2} 에 포함된 노드들의 교집합을 찾는다.⁶⁾

$NLS_{n1} \cap NLS_{n2} \neq \emptyset$ 이면 교집합의 원소들은 노선 r_{n1} 과 r_{n2} 간의 가능한 환승노드가 존재하게 된다. 교집합이 $\{n_1, n_2, \dots, n_k\}$ 이라면 k 개의 1회 환승노선들이 존재함을 의미한다.

<그림 8>은 1회 환승수요쌍을 갖는 후보노선집합의 생성과정을 설명한 것이다. 1-transfer path에 대한 총통행시간 추정치는 다음과 같다.⁷⁾

$$TT_{i \cap (n_1) \cap j} = t_{i,n1}^{wait} + t_{i,n1,n2}^{invt} + t_{n1,n2}^{wait} + t_{tp} + t_{n1,n2,j} \\ = \frac{60}{2 * f_{n1}} + t_{i,n1,n2}^{invt} + \frac{60}{2 * f_{n2}} + t_{tp} + t_{n1,n2,j}^{invt} \quad (18)$$

여기서,

$TT_{i \cap (n_1) \cap j}$: 노드 i 에서 노선 $n1$ 을 탑승하여 노드 $n1$ 에서 노선 $n2$ 으로 환승하여 노드 j 까지 통행하는데 소요되는 총통행시간

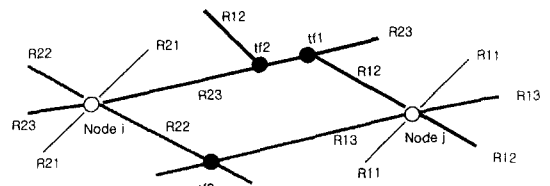
$t_{i,n1}^{wait}$: 노드 i 에서 노선 $n1$ 의 대기시간

$t_{i,n1,n2}^{invt}$: 노선 $n1$ 으로 노드 i, j 간 차내통행시간

$t_{n1,n2}^{wait}$: 노드 $n1$ 에서 노선 $n2$ 으로 환승대기시간

t_{tp} : 차내 통행시간과 동일한 환승 패널터

$t_{n1,n2,j}^{invt}$: 노드 $n1$ 에서 노선 $n2$ 로 환승후 노드 j 까지의 차내 통행시간



<그림 8> 1회 환승 노선의 후보노선생성 개념도

6) 여기서, r_{n1} 은 노드 i 를 경유하는 노선들 중 하나이며, r_{n2} 은 노드 j 를 경유하는 노선들 중 하나이다. NLS_{n1} 은 노드 i 를 경유하는 노선 r_{n1} 을 구성하는 노드리스트, $r_{n1} \in RS_i$ 이고 NLS_{n2} 은 노드 j 를 경유하는 노선 r_{n2} 을 구성하는 노드리스트, $r_{n2} \in RS_j$

7) 1회환승에 의한 기종점간 노선경로의 총통행시간구성요소는 첫 번째 탑승노선의 출발지에서의 대기시간과 환승지점까지의 탑승후 통행시간과 두 번째 노선으로 환승하기 위한 대기시간(환승시간)과 두 번째 노선의 탑승후 목적지까지의 탑승후 통행시간으로 구성됨. 여기서, 환승패널터는 환승에 따른 추가시간외에 환승에 따른 불편함에 대한 거부감을 통행시간의 값으로 정의한 값임. 이값은 사용자 정의계수로 지정하며, 일반적으로 5분~10분의 값으로 지정됨.

3. 2회 환승노선의 통행배분

노드 i 와 노드 j 를 지나지 않지만 RS_i 과 RS_j 노선 집합의 노드들과 동시에 노드를 공유하는 노선집합 (RS_{ij})을 찾는다. RS_{ij} 에 포함되는 노선의 노드리스트는 RS_i 과 RS_j 에 포함되는 노선의 노드리스트와 각각 교차하는 1개 이상의 노드들은 2-transfer paths를 형성하는 환승 노드들의 한 쌍이 된다.

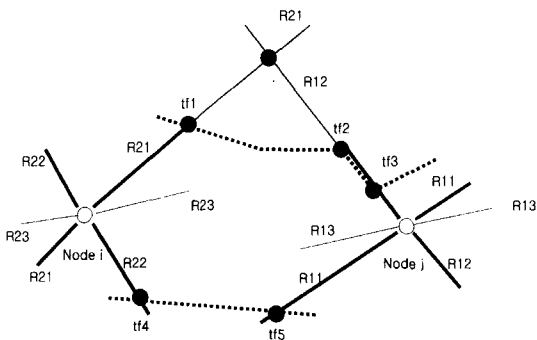
- Step 1 : 기점 i 와 종점 j 를 경유하지 않는 RS_{ij} 에 속하는 각 노선집합을 구하고, 각 노선의 노드 리스트를 산출한다.
- Step 2 : RS_{ij} 의 각 노선의 노드리스트와 RS_i 의 각 노선의 노드리스트의 교집합을 구한다.
- Step 3 : Step2에서 RS_{ij} 와 RS_i 간에 교차노드를 가지는 RS_{ij} 의 각 노선의 노드리스트와 RS_i 의 각 노선의 노드리스트의 교집합을 구한다.

2회 환승 노선의 총통행시간은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 TT_{i, n_{k1}, n_{k2}, j} &= t_{i, k1}^{wait} + t_{i, k1, n_{k1}}^{inv} + t_{n_{k1}, k2}^{wait} + t_{tp1} \\
 &+ t_{n_{k1}, k2, n_{k2}}^{inv} + t_{n_{k2}, k3}^{wait} + t_{tp2} + t_{n_{k2}, k3, j}^{inv} = \\
 &\frac{60}{2 * f_{k1}} + t_{i, k1, n_{k1}}^{inv} + \frac{60}{2 * f_{k2}} \\
 &+ t_{tp1} + t_{n_{k1}, k2, n_{k2}}^{inv} + \frac{60}{2 * f_{k3}} + t_{tp2} + t_{n_{k2}, k3, j}^{inv} \quad (19)
 \end{aligned}$$

여기서,

$TT_{i, n_{k1}, n_{k2}, j}$: 노드 i 에서 환승노드 n_{k1} 과 n_{k2} 를 경유하여 노드 j 까지의 총통행시간



(그림 9) 3회 환승노선의 후보노선생성 개념도

- $t_{i, k1}^{wait}$: 노드 i 에서 노선 $k1$ 의 이용자 대기시간
- $t_{i, k1, n_{k1}}^{inv}$: 노선 $k1$ 의 노드 i 에서 노드 n_{k1} 까지의 차내 통행시간
- $t_{n_{k1}, k2}^{wait}$: 노드 n_{k1} 에서 노선 $k2$ 의 환승 대기시간
- t_{tp1} : 차내 통행시간과 동일한 환승 패널티
- $t_{n_{k1}, k2, n_{k2}}^{inv}$: 노선 $k2$ 의 노드 n_{k1} 에서 노드 n_{k2} 까지의 차내 통행시간
- $t_{n_{k2}, k3}^{wait}$: 노드 n_{k2} 에서 노선 $k3$ 의 환승 대기시간
- t_{tp2} : 차내 통행시간과 동일한 환승 패널티
- $t_{n_{k2}, k3, j}^{inv}$: 노선 $k3$ 의 노드 n_{k2} 에서 노드 j 까지의 차내 통행시간

4. 3회 이상 환승노선의 경우

0-transfer path, 1-transfer path, 2-transfer-path로 서비스가 안 될 경우 기종점 노드 (i, j)간 통행수요는 현 버스 노선 체계로는 서비스가 될 수 없는 비만족 수요(Unsatisfied demand)로 분류된다.

5. 차량용량과 배치횟수 설정과정

통행수요는 노선별 배치횟수에 따라 버스 노선망에 통행배분된다. 노선을 이용하는 승객수와 노선구간 최대승객통행량은 통행배분결과에 의해 계산되며, 운영자 비용과 이용자비용으로 구성된 일반화비용을 최소화하는 차량크기는 Shih and Mahmassani(1994) 연구에서 제시된 식(20)을 적용한다.

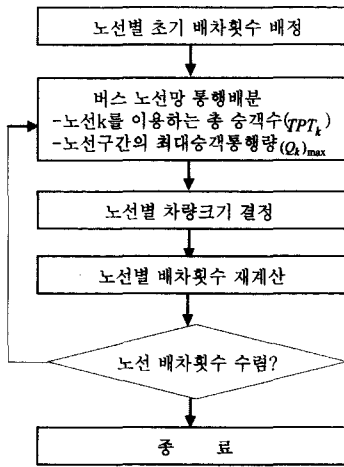
$$VS_k^* = \frac{(Q_k)_{max}}{LF_{max}} \sqrt{\frac{2 \cdot a \cdot RTL_k}{w \cdot TPT_k}} \quad (20)$$

여기서,

- a : 총 비용수준을 조정하는 상수
- RTL_k : 노선 k 에 대한 왕복통행거리
- w : 대기시간의 가중치
- TPT_k : 노선 k 의 시간당 총 승객통행량

배치횟수는 결정된 차량크기와 최대부하구간의 승객통행량을 입력값으로 하여 다음식과 같이 결정한다.

$$f_k = \frac{(Q_k)_{max}}{LF_{max} \cdot VS_k} \quad (21)$$



〈그림 10〉 배차횟수 및 차량크기 결정과정 (Shih and Mahmassani, 1994)

여기서

$(Q_k)_{max}$: 최대부하구간(MLS)상의 승객통행량

VS_k : 차량크기(좌석수)

LF_{max} : 최대부하계수

통행배분모형은 보정된 배차횟수와 입력 배차횟수간 수렴에 이를 때까지 반복하고 배차횟수가 더 이상이 변화되지 않고 수렴될 때 차량크기와 배차횟수가 결정된다.

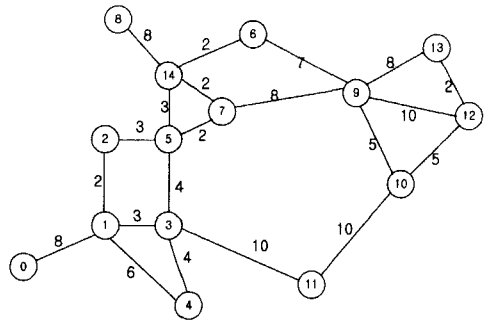
Ⅶ. 모형의 적용

1) Mandl's Transit Network 문제

Mandl문제에서 이용한 네트워크는 〈그림 11〉과 같이 15개 노드로 구성되고, 시간당 15,570통행의 총 통행량을 가지는 네트워크이다. Mandl's transit network에서 제시되지 않은 링크길이는 통행시간에 의한 전량통행배분 이후 "속도-통행량 설계함수⁸⁾"를 이용하여 통행량에 따라 결정된 속도를 통해서 노드간 통행거리를 도출한다.

2) 평가대상 노선생성

본 연구에서 개발한 버스노선체계 평가모형은 기 운



〈그림 11〉 Mandl's transit network 구조⁹⁾

영 중인 버스노선체계의 운영효과를 평가하거나 새로운 노선체계의 개편을 위한 개편대상노선의 성능을 평가하는데 그 목적이 있다. 버스 노선체계의 개편을 위한 최적 노선망의 선정은 III절에서 제시한 버스노선망설계모형의 목적함수를 최소화하는 노선집합과 각 노선의 배차횟수를 찾는 일련의 조합 최적화 문제(Combinational optimization problem)로 정의될 수 있다.

본 연구에서는 이러한 최적화문제의 최적해를 찾는 노선집합을 찾는 것은 아니며, 임의의 평가대상노선망이 제시되었을 때 평가모형이 어떠한 결과를 도출하며, 도출결과의 합리성여부를 해석하는데 목적이 있다. Mandl's transit network에서 임의의 평가대상 노선을 〈표 2〉와 같이 선정하였다.

〈표 2〉 평가대상 노선망 생성

노선집합 크기	평가대상 노선망	통행수요 (인/시)
1	0↔1↔2↔5↔7↔9↔10↔12↔13	9,790
2	4↔3↔5↔7↔9↔10↔12↔13	7,444
	0↔1↔2↔5↔7↔9↔6↔14↔8	8,456
3	6↔9↔10↔12	3,094
	0↔1↔2↔5↔14↔6	5,560
	4↔3↔5↔7↔9↔10↔11	8,476
4	5↔14↔8	620
	4↔3↔5↔7↔9↔10↔11	5,008
	6↔14↔5↔7↔9↔10↔12↔13	4,450
	0↔1↔2↔5↔7↔9↔6↔14	7,521
5	5↔14↔8	620
	2↔5	376
	13↔12↔10↔9↔6↔14	4,017
	0↔1↔2↔5↔14↔6	5,340
	4↔3↔5↔7↔9↔10↔11	8,606

8) 버스노선 대상가로의 선정을 위해서 S. Carrese et al.(1998)의 연구에서 제시한 버스의 규모의 경제를 나타내는 통행속도와 통행수요간의 관계(Speed-Flow Diagram)을 의미함. Mandl's Transit Network에서 링크통행시간값만이 제시되었으며, 링크통행거리가 제시되지 않아 이를 구하기 위한 함수임.

9) Mandl's Transit Network의 기준점통행량(15×15)은 Y. J. Lee(1998)논문 pp133을 참고바람.

```

N : =====
N :          BTRAEM Report
N :          =====
N :          [Route Information]
N : [0 (<- 13)] : ( 0, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 12, 13 )
N : - Trip Length(8,967 km), Trip Time(75,418 min),
N :   Frequency(51,768), Vehicle Size(29,748),
N :   Fleet Size(65,070)
N :
N :          [Demand Information]
N : - Network Total Demand : 15570,000
N : - Demand Satisfied without transfer : 9790,000(62.877%)
N : - Demand Satisfied with 1 transfer : 0,000(0.000%)
N : - Demand Satisfied with 2 transfer : 0,000(0.000%)
N : - Unsatisfied Demand : 5780,000(37.123%)
N :
N :          [User Cost]
N : - Network Total Travel Time : 105234,055
N : - In-Vehicle Travel Time : 99560,666
N : - Network Total Waiting Travel Time : 5673,389
N : - Network Total Transfer Time : 0,000
N : - Network Total Transfer Penalty : 0,000
N :
N :          [Operating Cost]
N : - Number of Routes : 1
N : - Network Total Operating Length : 464,186
N : - Network Total Operating Time : 3904,215
N :
N :          [System Utilization]
N : - Total Actual User Trip Length : 12355,000
N : - Maximum User Trip Length : 17260,833
N :
N :          [Network Structure]
N : - Degree of Circuity(DOC) : 3,497 %
    
```

〈그림 12〉 BTRAEM의 결과물 형태

3) 버스 노선체계 평가모형의 결과 해석

노선집합 크기별로 정의된 평가대상 노선망에 대해 서 Visual-C++를 이용하여 코딩된 BTRAEM프로그램의 결과물형태는 〈그림 10〉과 같다.

Mandl's transit network의 기종점통행량에 대해서 노선망내 노선집합크기를 1개 노선에서 5개 노선까지 각 노선망 구조에 대해서 BTRAEM의 수행결과를 〈표 3〉과 같이 정리하였다.

환승횟수별 서비스 통행수요는 노선집합크기가 커짐에 따라 서비스 통행수요가 증가하고, 환승횟수별 서비스통행량을 산출할 수 있다. 이러한 결과는 환승무료화에 따른 환승보조금 규모의 적정성을 판단할 수 있는 중요한 평가자료가 될 수 있다.

이용자 측면의 평가결과에서 노선집합이 커진다고 이용자 통행시간 구성요소값들이 증가하는 것은 아니며, 노선망을 어떻게 구성하느냐에 따라 이용자 통행시간 구성요소들은 감소됨을 알 수 있다. 운영자 측면의 평가결과를 살펴보면 차량 총 운행시간(거리)는 대체적으로 노선집합이 커질수록 증가한다.

노선망 이용률은 운영자측의 노선 및 차량 투입에 대해서 실제 이용자의 이용정도를 나타내는 지표인데 노선집합크기와는 상관없이 노선집합의 구성에 따라 이용률이 결정됨을 알 수 있다. 예제 네트워크의 결과를 보면 이용률이 가장 낮은 것은 노선집합크기가 3인 노

〈표 3〉 노선집합크기별 버스 노선망 평가결과

노선망 평가지표	단위	노선집합크기(Route Set Size)				
		1	2	3	4	5
% 직결통행수요	통행 (%)	9,790 (62.9)	13,160 (84.5)	11,590 (74.4)	13,540 (87.0)	12,180 (78.2)
% 1회환승수요	통행 (%)	0	1,370 (8.8)	2,770 (17.8)	2,030 (13.0)	3,390 (21.8)
% 2회환승수요	통행 (%)	0	0	0	0	0
% 비만족수요	통행 (%)	5,780 (37.1)	1,040 (6.7)	1,210 (7.8)	0	0
총 노선연장	km	8.97	17.93	16.67	26.43	20.87
이용자 총 통행시간	인·분	105,234	193,078	185,082	210,713	209,045
이용자 총 차내통행시간	인·분	99,561	176,009	161,045	187,670	180,287
이용자 총 대기시간	인·분	5,673	9,340	8,595	11,296	9,621
이용자 총 환승시간	인·분	0	7,729	15,442	11,747	19,137
이용자 총 환승패널티	인·분	0	6,850	13,850	10,150	16,950
차량소요대수	대	65	120	124	150	146
차량 총 운행거리	대·km	464	836	833	1,055	966
차량 총 운행시간	대·분	3,904	7,151	7,431	8,971	8,702
이용자 실제 총 통행거리	인·km	12,355	21,315	19,255	22,408	21,300
이용자 최대 총 통행거리	인·km	17,261	32,973	31,953	36,494	34,656
노선망 이용률	%	71.6	64.6	60.3	61.4	61.5
노선망 굴곡도	%	3.5	68.2	41.4	40.8	40.9
목적함수값	분/인	32.0	21.9	22.3	20.4	20.1

선망으로 나타났다. 노선집합크기가 4인 노선망은 이용자 통행시간 구성요소들이 가장 높게 나왔으며 노선집합크기가 5인 노선망은 차량 총 운행거리(시간)가 다른 노선망의 서비스 통행수요의 크기와 비교시 상대적으로 적은 것으로 분석되었다. 결과적으로 운영자측의 가중치를 높게 고려할 경우 노선집합크기가 5인 노선망이 좋은 대안으로 사료된다.

운영자 비용과 관련하여 노선집합크기가 1인 노선망은 이용자 통행시간과 차량 운행거리(시간)이 노선집합크기 5인 노선망보다 적은 값이 나왔으나 궁극적으로 서비스 통행수요의 크기가 노선집합크기 5인 대안보다 적은 값이 도출되었다.

버스 노선망 대안평가는 다수의 정책 결정자들이 상충하는 복잡한 문제이다. 연구자 및 계획가는 이러한 각 이해당사자의 입장을 반영할 수 있는 평가지표에 대한 분석결과를 근거로 합리적이고 효과적인 대안평가가 이루어져야함을 분석결과를 통해 알 수 있다.

Ⅳ. 결론 및 향후 연구방향

본 연구는 버스 노선망 설계 과정에서 다양한 평가지표의 정량적 산출이 가능하고 관련 주체들의 입장과

시각을 반영할 수 있는 버스 노선체계 평가모형을 개발하였다. 이 연구에서는 평가모형의 정립을 위해서 국외의 버스 노선망 평가모형의 개발추이를 검토하고, 평가모형에 적용할 버스 노선망 설계 문제의 목적함수와 제약조건을 정의하였다. 또한 평가모형의 구동을 위해서 요구되는 입·출력자료 및 분석구조에 대해서 검토하였다. 마지막으로 버스 이용자들의 대중교통 노선선택 및 통행배분모형을 평가모형 내에 반영하였다.

정립된 버스 노선망 평가모형을 Mandl's Transit Network에 적용한 결과, 노선망 구조의 성능을 특징 짓는 변수들에 대한 의미있는 결과값이 도출되었다. 향후 이 연구에서 개발된 버스 노선망 평가모형은 다양한 버스 노선망 대안에 대해서 관련 이해당사자들의 입장과 시각을 균형 있게 반영할 수 있는 후보노선생성 알고리즘의 개발과 후보노선집합의 최적조합 알고리즘 개발이 추가적으로 연구되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 이상용·박경아(2003), "시내버스노선체계 평가를 위한 정량적 지표의 설정 및 적용", 대한교통학회지, 제 21권 제4호, 대한교통학회, pp29~44.
2. 이신해(2002), "대중교통 통행배정 모형개발 및 통행량 기반 대중교통 기종점 통행량 추정", 서울대학교 대학원 박사학위논문.
3. 윤혁렬(2000), "용량을 고려한 대중교통 통행배정 모형 구축에 관한 연구", 서울대학교 대학원 박사학위논문.
4. Baaj(1990), "The Transit Network design Problem: An AI-based approach", Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
5. L. J. Leblanc(1988), "Transit System Network Design", Transpn. Res.-B Vol.22B, No.5. pp.383~390.
6. S. Carrese and S. Gori(1998), "An Urban Bus Network Design Procedure", 6th meeting of the Euro WG on Transportation, Gothenburg, Sweden.
7. Shih, Mao-Chang 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.
8. Spiess, H. and Florian, M.(1989), "Optimal Strategies: A New Assignment Model for Transit Networks," Transportation Research B, Vol.III, No.2, pp.83~102.
9. Wei fan 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.
10. Y. Israeli and A. Ceder(1996), "Public Transportation Assignment with passenger Strategies for Overlapping Route Choice", In Transportation and Traffic Theory(13th ISTTT), pp.561~588.
11. Y. J. Lee(1998), Analysis and Optimization of Transit Network Design with Integrated Routing and Scheduling, ph.d Dissertation, University. of Pennsylvania.

✉ 주 작 성 자 : 한종학

✉ 논문투고일 : 2005. 2. 11

논문심사일 : 2005. 3. 18 (1차)

2005. 3. 23 (2차)

2005. 3. 28 (3차)

심사판정일 : 2005. 3. 28

✉ 반론접수기한 : 2005. 8. 31