■ 論 文 ■

복합수단을 고려한 확률적 대중교통 통행배정모형 개발

A Stochastic Transit Assignment Model based on Mixed Transit Modes

박 경 철
(경기개발연구원 초빙책임연구원)

문 정 준
(한국토지공사 사원)

이 성 모
(서울대학교 지구환경시스템공학부 교수)

박 창 호
(서울대학교 지구환경시스템공학부 교수)

목 차

Ⅰ. 서론
1. 연구의 배경 및 목적
2. 연구의 범위
Ⅱ. 이론적 고찰
1. 대중교통 통행배정모형
2. 개별행태모형
Ⅲ. 통행배정 모형구축
1. 모형개요
2. 제약조건 설정
3. 가능 경로탐색
4. 경로선택모형 구축
Ⅳ. 모형계수 추정
1. 분석자료
2. 분석결과
3. 분석종합
Ⅴ. 모형의 적용 및 평가
1. 분석대상 및 제약조건 설정
2. 통행배정 결과
3. 기존 연구와 비교
Ⅵ. 결론 및 향후 연구과제

Key Words : 대중교통 통행배정, 다항로짓모형, 효용함수, 서울시 교통카드, 환승
Transit assignment, Multinomial logit model, Utility function, Seoul metropolitan smart card, Transfer

요 약

대중교통 통행배정 모형은 대중교통 이용자들의 행태를 예측하고 분석할 수 있는 모형으로 대중교통 관련 정책이나 대안들을 평가하기 위한 기초 자료를 도출해 주는 중요한 역할을 담당한다. 기존의 대중교통 통행배정 모형은 대중교통 수단의 특성을 감안한 모형이라기보다는 개별차량의 통행배정 이론을 적용한 것들이 대부분이다. 또한 단일수단(버스나 지하철)을 기준으로 통행배정 모형을 구축하는 경우가 많았다. 그러므로 기존의 방법으로는 변화되는 대중교통체계 내에서 이용자들의 정확한 통행행태를 분석하는 것이 불가능하다.

본 연구에서는 이와 같은 기존 연구의 한계를 극복하고 보다 현실적인 대중교통 통행배정 모형을 개발하는 것을 목적으로 한다. 새로운 배정모형은 단일수단이 아닌 복합수단을 기초로 통행자들의 개별적인 통행시간 및 환승에 대한 인식차이를 반영할 수 있는 확률적인 모형이다. 모형 개발을 위한 자료는 이용자들의 실제 통행실태 자료인 서울시 대중교통체계의 교통카드 자료를 활용하였다.

본 연구 모형은 향후 다양한 대중교통 정책 및 노선을 평가하는데 활용될 수 있으며 보다 효율적인 대중교통 활성화 방안을 수립하는데 기여할 수 있을 것이다.

A transit assignment model can forecast the behaviors of transit users, thereby playing an important role in the evaluation of transit policies. Most existing transit assignment models are based on the models for passenger cars; therefore they cannot reflect the specific characteristics of transit modes. In addition most of the existing models are based on a single transit mode (bus or rail), and they cannot forecast the behaviors of transit users in a changing mass transportation system.

The goal of this study is to overcome these problems with the exiting models and to develop a more realistic model. The newly developed model is based on mixed transit modes and is a stochastic model that can reflect the different preferences of each transit user for travel time and transfering. Data gathered from the Seoul metropolitan area's smart card are used to calibrate this model.

This study is expected to be used for the evaluation of transportation policies and to attribute the development of transit revitalization strategies.

Ⅰ. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

지난 2004년 7월 서울시 대중교통체계 개편 과정에서 버스와 지하철이 통합된 요금이 적용되고 있으며, 최근 여러 시·도에서 이와 같은 수단간 통합요금제도 도입이 논의되고 있는 실정이다.

이와 같이 수단간 요금이 통합되면 대중교통 이용자들은 지하철과 버스 수단을 서로 다른 수단으로 인식하지 않고 대중교통 수단이라는 동일한 범주로 분류하게 된다. 즉, 통행경로의 선택에 있어 더 이상 대중교통 수단 간의 구별은 큰 의미를 갖지 못하며, 경로선정에 있어서도 환승에 의한 복합적인 수단을 기준으로 하게 된다.

기존의 대중교통 통행배정 모형은 대중교통 수단의 특성을 감안한 모형이라기보다는 개별차량의 통행배정 이론을 적용한 것들이 대부분이었고 또한 버스나 지하철 등 단일수단을 기준으로 통행배정 모형을 구축함으로써 수단간 환승을 제대로 반영하지 못하는 경우가 많았다. 본 연구는 이와 같은 기존 연구의 한계를 극복하고 변화하는 대중교통체계에서 보다 현실적인 대중교통 통행배정 모형을 개발하는 것을 목적으로 한다.

2. 연구의 범위

본 연구에서 개발한 모형은 복합수단을 고려할 수 있는 확률적인 대중교통 통행배정모형이다. 복합수단 선택에 있어서 가장 중요한 것은 수단간 비용이 동일해야 한다는 것이다. 따라서 본 연구에서는 다양한 대중교통수단 중 요금이 통합될 수 있는 버스와 지하철만을 대상으로 하였으며 분석과정에서 통합요금체계를 전제로 하였다. 이를 위해 버스와 지하철이 통합되어 운영되고 있는 서울시 대중교통 통행자료를 기초로 모형을 구축하고 평가하였다.

Ⅱ. 이론적 고찰

1. 대중교통 통행배정모형

1) 결정적 모형

(1) 전량 통행배정 모형

결정적 통행배정 기법 중 가장 초보적인 기법으로는 정류장에서의 대기시간과 다른 노선으로의 환승을 고려하여 출발지와 목적지 사이의 단일 최단경로를 찾고 그 경로 위에 수요를 전량 배정하는 방법이 있다. 이 기법은 출발지와 목적지 사이의 통행량이 작고 두 지점을 연결하는 경로의 수가 적으며 이들 경로비용이 서로 크게 차이가 날 때 타당성을 가진다.

전량 통행배정 모형은 통행의 희망경로에 따른 이론적 통행수요를 파악하고 기본적인 노선망 계획을 구상하는데 필요한 기초적인 정보를 얻는데 유용하다. 그러나 도시의 발달과 더불어 노선수가 증가하고 대중교통 통행량이 증가하는 경우 모형의 현실성이 떨어진다.

(2) 최적전략에 의한 통행배정 기법

대중교통 통행배정 기법 중 가장 대표적인 것으로 Spiess와 Florian(1989)에 의해 개발된 최적전략에 의한 통행배정 기법이 있으며 현재 널리 사용되고 있는 교통계획 소프트웨어인 EMME/2에 내장되어 있다. 최적전략 모형에서 사용되는 목적함수식과 제약조건은 식 (1)~(4)와 같다.

$$Min \sum_{a \in A} c_a v_a + \sum_{i \in I} w_i \tag{1}$$

$$s.t. \sum_{a \in A_i^+} v_a - \sum_{a \in A_i^-} v_a = g_i, \; i \in I \tag{2}$$

$$v_a \le f_a w_i, \; a \in A_i^+, \; i \in I \tag{3}$$

$$v_a \ge 0, \quad a \in A \tag{4}$$

여기서, $A = a$: 링크집합
$I = i$: 노드집합
A_i^+ : 노드 i를 나가는 링크의 집합
A_i^- : 노드 i에 들어오는 링크의 집합
g_i : 노드 i에서 목적지로의 통행수요
V_i : 노드 i에서의 통행량
v_a : 링크 a의 통행량
c_a : 링크 a의 통행비용
f_a : 링크 a의 운행횟수
w_i : 노드 i에서의 총대기시간

이 기법은 승객이 최적전략에 속하는 노선의 차량 중에서 먼저 오는 차량에 승차한다고 가정함으로써 운행횟수에 비례하여 노드 통행량을 링크에 배분한다. 이 모형

이 내재된 EMME2 프로그램은 대중교통 통행배정의 수행속도가 빠를 뿐 만 아니라 정류장에서의 승객의 행태를 합리적으로 반영할 수 있으나, 복합수단 통행배정에서 서로 다른 수단간 선호의 차이를 반영할 수 없다는 단점이 있다.

2) 확률적 모형

(1) 로짓기반 모형

로짓모형은 링크통행비용의 오차분포가 와이블(weibull)분포함수 형태의 서로 독립적이며 동일한 형태의 분포(Independent and Identical Distribution)를 갖는다는 가정에서 얻어진다.

각 대안들에 대한 효용함수가 서로 독립적이어야 한다는 제약 때문에 복잡한 교통망상에서의 경로선택과 같이 각 대안의 효용함수가 상호 의존적인 경우에는 적용하기 어렵다는 단점이 있으나, 수학적으로 다루기 쉬운 구조를 가지고 있다는 장점이 있어 통행배정 분야에 많이 활용되고 있다.

(2) 프로빗기반 모형

프로빗기반 통행배정 모형은 링크통행비용의 오차분포가 정규(Normal) 분포를 따른다고 가정한 것으로, 로짓모형의 비현실적인 가정인 비관련 대안간 독립성(IIA : Independence from Irrelevant Alternatives)이 필요없는 장점이 있으나 정산과정이 복잡하여 현실에 적용하기 어려운 단점이 있다.

각 링크의 인지통행시간 밀도함수는 표본추출을 하고 기종점간 통행량은 링크 인식통행시간에 대한 표본추출을 기초로 최단경로 인지통행시간에 배정하며 이런 표본추출과 배정을 여러번 반복 후 종료시 최종적으로 생산한 교통량 패턴을 평균하여 각 링크에 부하하는 것이다.

2. 개별행태모형

1) 이항로짓모형(Binary Logit Model)

대안의 효용을 임의변수(random variable)로 보는 것이 가장 설명력을 가진다고 보고 선택결정권자 n이 선택 집합 C_n에서 대안 i를 선택할 확률로서 임의효용모형(random utility model)을 나타내면 식(5)와 같다.

$$P(i \mid C_n) = \Pr(U_{in} \geq U_{jn}, \forall j \in C_n) \tag{5}$$

효용함수의 임의항을 $\epsilon_{jn} - \epsilon_{in} = \epsilon_n$, Logistic 분포로 가정하면 이 때 $\epsilon_{jn} - \epsilon_{in} = \epsilon_n$의 각각의 ε의 값이 i.i.d Gumbel(type Ⅰ)분포를 따른다는 것과 일치하게 된다. Logistic 분포의 누적분포함수와 확률밀도함수는 식(6), (7)과 같다.

$$F(\epsilon_n) = \frac{1}{1+e^{-\mu\epsilon_n}}, \quad \mu > 0, \ -\infty < \epsilon_n < \infty \tag{6}$$

$$f(\epsilon_n) = \frac{\mu e^{-\mu\epsilon_n}}{(1+e^{-\mu\epsilon_n})^2} \tag{7}$$

이상의 내용을 통해 대안 i를 선택할 확률은 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned} P_n(i) &= \Pr(U_{in} \geq U_{jn}) \\ &= \frac{1}{1+e^{-\mu(V_{in}-V_{jn})}} = \frac{e^{\mu V_{in}}}{e^{\mu V_{in}} + e^{\mu V_{jn}}} \end{aligned} \tag{8}$$

2) 다항로짓모형(Multinomial Logit Model)

두 가지 이상의 대안이 있는 좀 더 일반적인 모형은 이항선택의 경우 보다 훨씬 복잡한데, 특히 $\epsilon_{jn} - \epsilon_{in}$ 로 표현되는 오차항 차이의 분포가 일변량 분포가 아닌 결합 확률분포로 결정하여야 한다. 각 개인이 C_n 이라고 정의된 합리적인 선택집합을 가질 때, $J_n \leq J$ 라는 개수의 합리적 선택들이 존재한다. 따라서 결정권자 n이 대안 i를 선택할 확률은 식(9)와 같다.

$$P(i \mid C_n) = \Pr(U_{in} \geq U_{jn}, \forall j \in C_n) \tag{9}$$

이를 고정효용과 임의효용으로 나누어서 표현하면 식(10)과 같다.

$$\begin{aligned} P_n(i) &= \Pr(U_{in} \geq U_{jn}, \forall j \in C_n, j \neq i) \\ &= \Pr(V_{in} + \epsilon_{in} \geq V_{jn} + \epsilon_{jn}, \forall j \in C_n, j \neq i) \\ &= \Pr(\epsilon_{jn} \leq V_{in} - V_{jn} + \epsilon_{in}, \forall j \in C_n, j \neq i) \end{aligned} \tag{10}$$

여기서 어떠한 특정 다항선택 모형도 오차의 결합분포를 가정함으로써 유도될 수 있다. 오차항에 대한 결합

확률 밀도함수를 $f(\epsilon_{1n},\epsilon_{2n},\cdots,\epsilon_{j,n})$라고 하고 누적분포함수를 사용하면 첫 번째 대안의 선택확률은 식(11)과 같이 표현된다.

$$P_n(1)=\int_{\epsilon_{1n}=-\infty}^{\infty} F_1(\epsilon_{1n},\ V_{1n}-V_{2n}+\epsilon_{1n},\cdots,\ V_{1n}-V_{J,n}+\epsilon_{1n})d\epsilon_{1n} \quad (11)$$

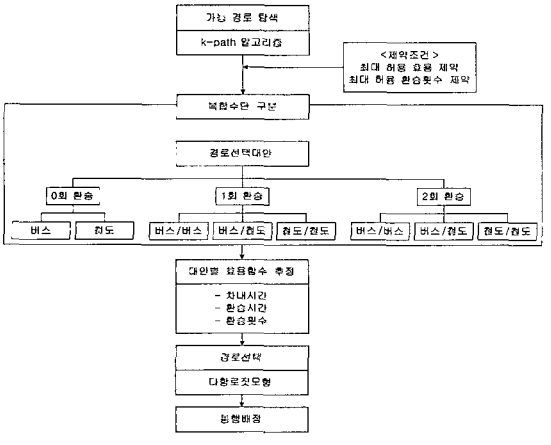
이는 ϵ_{1n}의 값이 주어지고 다른 모든 오차가 $V_{in}+\epsilon_{in} \geq V_{jn}+\epsilon_{jn}, \forall j \in C_n, j \neq i$를 만족할 때의 적분값이 첫 번째 대안을 선택하는 확률이 된다. 여기서 ϵ_{in}이 IID(independent and identical distribution)를 만족하고, Gumbel(type-I, Weibull) 분포를 따른다면 이러한 경우 다항로짓모형이 된다. 다항로짓모형의 선택확률은 식(12)와 같이 표현된다.

$$P_n(i)=\frac{e^{V_{in}}}{\sum_{j\in C_n} e^{V_{jn}}} \quad (12)$$

Ⅲ. 통행배정 모형구축

1. 모형개요

본 연구에서의 통행배정 모형 구축을 위해서는 복합수단을 결정하는 것이 선행되어야 한다. 이를 위해 환승 및 대중교통수단을 고려하여 총 8개의 선택대안을 구분하였다. 수단별 대안 경로탐색은 Yen(1971) k-path 알고리즘을 활용하였는데, 효율적인 경로집합 생성을 위해 최대허용 비효용 제약 및 최대허용 환승횟수 제약 조건을 도입하였다.



〈그림 1〉 모형개요

경로탐색 과정을 통해 추출된 경로 대안별 차내시간, 환승시간, 환승횟수를 기준으로 각 경로에 대한 효용값이 산정되면 다항로짓모형에 적용하여 각 대안별 선택확률이 계산되며 이를 토대로 통행배정이 이루어지게 된다.

2. 제약조건 설정

1) 최대허용 비효용 제약

다른 경로대안에 비해 우회하거나 대기시간 증가로 인해 통행시간이 길어진 경로는 이용자들이 이용을 하지 않는 비현실적인 대안이 된다. 이와 같은 비현실적인 경로는 경로선택 대안에서 제외하는 것이 모형의 효율성을 높일 수 있다. 따라서 본 연구에서는 식(13)과 같은 최대허용 비효용 제약조건을 모형에 포함하였다.

$$U_{ij}^{k} \leq \alpha \cdot Min[U_{ij}^{all}] \quad (13)$$

여기서, U_{ij}^{all} : i, j간 모든 경로의 비효용
U_{ij}^{k} : i, j간 이용 가능한 경로 k의 비효용
α : 최대허용 비효용 계수

2) 최대허용 환승횟수 제약

기존 통행배정은 환승에 대한 고려가 미흡한 문제점이 있다. 예를 들어 환승횟수가 통행자들이 인내할 수 있는 횟수를 초과한 경로라면 실제 통행자들은 이와 같은 경로는 포기하게 된다. 따라서 보다 합리적인 통행배정을 위해서는 환승횟수에 대한 고려가 필수적이다.

Baaj(1990)의 경우는 환승횟수를 기준으로 한 통행배정 모형을 제시하였는데, 통행배정 경로는 2회 환승횟수 경로까지 가능하다고 전제하였으며 환승횟수가 3회 이상이 되면 통행자들은 대중교통 수단 자체를 포기하여 대중교통 서비스를 받지 못하는 비만족수요로 규정하였다. 본 연구에서도 식(14)와 같이 최대허용 환승횟수 제약조건을 도입하였다.

$$T_{ij}^{all} \leq T^{\max} \quad (14)$$

여기서, T_{ij}^{all} : i, j 간 선택된 모든 경로의 환승횟수
$T^{\max}$: 최대허용 환승횟수

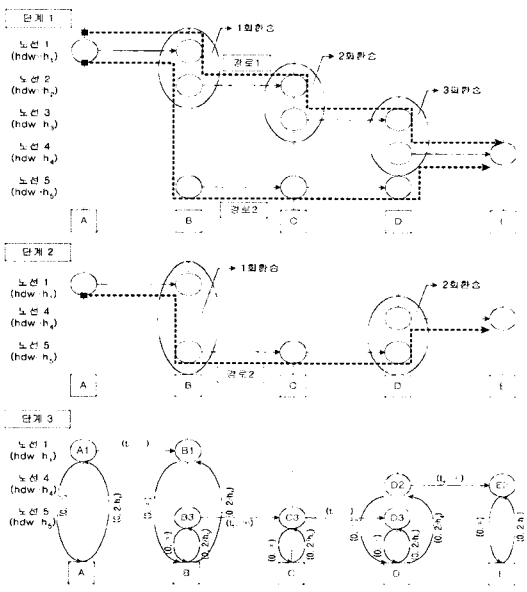
3. 가능 경로탐색

1) 네트워크 재설계

환승횟수 제약을 고려한 가능 경로를 탐색하기 위해서는 분석 네트워크에서 환승횟수 제약을 고려한 수정된 네트워크가 필요하게 된다.

즉, 분석대상 네트워크에서 환승횟수가 최대허용 환승횟수 제약조건을 만족하는 노선만으로 구성된 네트워크 재설계 과정이 필요하다. 본 연구에서 최대허용 환승횟수 제약조건을 고려한 네트워크 재설계 과정은 3단계로 이루어진다.

단계 1 : 초기 분석 네트워크
단계 2 : 최대허용 환승횟수 제약조건을 고려하여 환승횟수가 3회 이상인 경로에 이용되는 노선망은 분석에서 제외함
단계 3 : 환승횟수 제약조건을 만족하는 노선들에 대해서 환승링크 및 개별 노선을 표현할 수 있도록 노드 및 링크를 추가함



〈그림 2〉 네트워크 재설계 과정

2) 후보경로 탐색

분석 네트워크를 재설계 후, 본 연구에서는 Yen(1971) k-path 알고리즘에 최대허용 비효용 제약조건을 추가하여 k개의 가능 경로 집합을 생성하게 된다. 수정된 k-path 알고리즘은 다음과 같다.

<변수의 정의>

d_{ij} : 노드 i와 노드 j를 연결하는 링크의 통행비용
A^k : k번째 최단경로(단, 여기서 최단경로라 함은 최소 비효용 경로를 말하며 이하 동일)
A_i^k : A^{k-1}번째의 최단경로 중 노드 i에서 이탈되어 만들어진 k번째 최단경로($i=1,2,\cdots,Q_k$)
R_i^k : A_i^k의 부경로로 노드 1에서 노드 i까지는 A_i^{k-1}번째 최단경로와 동일
S_i^k : A_i^k의 부경로로 노드 i에서 노드 N까지의 경로 $A_i^k = R_i^k + S_i^k$
$List\,A$: k번째 최단경로 리스트
$List\,B$: $k+1$번째 최단경로의 후보 리스트

<알고리즘>

반복 1. A^1의 계산 : 효율적인 최단경로 알고리즘을 이용하여 첫 번째 최단경로를 찾고 이것을 $List\,A$에 저장
반복 k. A^k의 계산($k=2,3,\cdots,K$)

Ⅰ. 각 $i=1,2,\cdots,Q_{k-1}$에 대해 다음 절차 수행
〔단계 1〕
① 만약 A^{k-1}의 노드i까지의 경로 = A^j의 노드i까지의 경로이면 $d_{iq}=\infty$ (q는 A^j의 i번째 노드), 그렇지 않으면 변화없음
② 노드1에서 노드i까지의 부경로를 A_i^k의 R_i^k로 설정
③ 〔단계 2〕로 진행
〔단계 2〕
① 최단경로 알고리즘을 이용하여 노드i에서 노드N까지 최단경로 결정
② 노드i에서 노드N까지 부경로를 A_i^k의 S_i^k로 설정. 여기서 부경로가 여러 개인 경우 임의로 1개를 S_i^k로 설정함
〔단계 3〕
R_i^k와 S_i^k를 결합하여 A_i^k를 만들고 이것을 $List\,B$에 추가. 여기서 주의할 사항은 $List\,B$에는 $K-k+1$개의

A_i^k만 저장

Ⅱ. 만약 *List B*의 최단경로의 비효용이 A^1의 비효용보다 α(최대허용 비효용 계수)배를 넘으면 정지하고, 그렇지 않으면 *List B*의 최단경로를 *List A*로 옮기고 $k=k+1$ 후 위의 과정을 반복

4. 경로선택모형 구축

1) 선택대안 구성

가능경로 집합에서 경로선택 모형을 구축하기 위해 경로에 이용되는 수단 및 환승횟수를 기준으로 〈표 1〉과 같은 복합수단 선택대안을 설정하였다.

〈표 1〉 선택대안 설정

구 분	환승 횟수	이용 수단	이용형태	변수 표현
선택대안1	0회	버스	버스 단독	B_0
선택대안2		철도	철도 단독	R_0
선택대안3	1회	버스	버스→버스	B_1
선택대안4		철도	철도→철도	R_1
선택대안5		버스 철도	버스→철도 철도→버스	M_1
선택대안6	2회	버스	버스→버스→버스	B_2
선택대안7		철도	철도→철도→철도	R_2
선택대안8		버스 철도	버스→버스→철도 버스→철도→버스 철도→버스→버스 버스→철도→철도 철도→철도→버스 철도→버스→철도	M_2

2) 변수설정 및 효용함수 구축

총8개의 복합수단에 대한 분담모형을 구축하기 위해 각 수단별 통행시간, 환승횟수 등을 독립변수로 선정하였다. 특히 버스수단과 철도수단의 차이 및 본 연구에서 정의한 수단대안의 특성을 규명하기 위해 효용함수 구축 시 다음을 고려하여 총 12개의 분석대안을 설정하였다.

첫째, 경로의 철도 이용시간 비율을 별도로 고려한 경우와 그렇지 않은 경우

둘째, 환승 페널티를 별도로 독립변수로 선정한 경우와 그렇지 않은 경우

셋째, 버스와 지하철 두 개 수단의 통행시간을 별도로 구분한 경우와 차내시간으로 통합한 경우

넷째, 차내 통행시간과 차외 통행시간을 별도로 구분한 경우와 통행시간으로 통합한 경우

〈표 2〉 분석대안 설정

구 분		효 용 함 수
대안 1	ⓐ	$U_m = a_1 \cdot R_m^{in} + a_2 \cdot B_m^{in} + a_3 \cdot T_m^{out} + n_1 + n_2$
	ⓑ	$U_m = b_1 \cdot T_m^{in} + b_2 \cdot T_m^{out} + n_1 + n_2$
	ⓒ	$U_m = c_1 \cdot T_m^{all} + n_1 + n_2$
대안 2	ⓐ	$U_m = a_1 \cdot R_m^{in} + a_2 \cdot B_m^{in} + a_3 \cdot T_m^{out}$
	ⓑ	$U_m = b_1 \cdot T_m^{in} + b_2 \cdot T_m^{out}$
	ⓒ	$U_m = c_1 \cdot T_m^{all}$
대안 3	ⓐ	$U_m = a_1 \cdot R_m^{in} + a_2 \cdot B_m^{out} + a_3 \cdot T_m^{out} + a_4 \cdot R_m^{ratio} + n_1 + n_2$
	ⓑ	$U_m = b_1 \cdot T_m^{in} + b_2 \cdot T_m^{out} + b_3 \cdot R_m^{ratio} + n_1 + n_2$
	ⓒ	$U_m = c_1 \cdot T_m^{all} + c_2 \cdot R_m^{ratio} + n_1 + n_2$
대안 4	ⓐ	$U_m = a_1 \cdot R_m^{in} + a_2 \cdot B_m^{out} + a_3 \cdot T_m^{out} + a_4 \cdot R_m^{ratio}$
	ⓑ	$U_m = b_1 \cdot T_m^{in} + b_2 \cdot T_m^{out} + b_3 \cdot R_m^{ratio}$
	ⓒ	$U_m = c_1 \cdot T_m^{all} + c_2 \cdot R_m^{ratio}$

여기서, U_m : 복합수단 m의 효용

R_m^{in} : 복합수단 m의 철도 차내시간(분)

B_m^{in} : 복합수단 m의 버스 차내시간(분)

T_m^{in} : 복합수단 m의 차내시간 합(분)

T_m^{out} : 복합수단 m의 환승시간(분)

T_m^{all} : 복합수단 m의 통행시간 합(분)

R_m^{ratio} : $\frac{R_m^{in}}{T_m^{in}}$ 복합수단 m의 철도통행시간 비율(%)

n_1 : 1회 환승에 대한 페널티

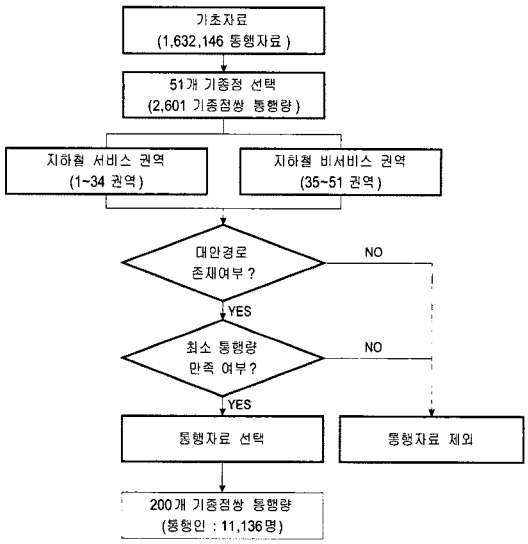
n_2 : 2회 환승에 대한 페널티

Ⅳ. 모형계수 추정

1. 분석자료

본 연구 모형의 계수 추정은 서울시 교통카드 통행자료 중 2006년 3월 2일 평일 오전첨두시 자료를 이용하였으며 자료구축 과정은 〈그림 3〉과 같다.

먼저 오전 첨두시인 7시부터 9시 사이에 통행을 시작하고 끝마친 1,632,146래코드를 추출 후, 선정된 51개 기종점에 의해 조합된 2,601개 기종점쌍별로 통행데이터를 분류하였다. 이 중 통행량이 작은 기종점 자료 및 최단경로(예, 지하철 단일경로) 하나로 경로선택이 집중



〈그림 3〉 분석자료 구축

되는 경우를 제외하여 최종적으로 200개 기종점쌍에 대한 11,136인의 통행자료를 분석데이터로서 정리하였다.

이 때 선정된 51개 기종점 중 34개는 지하철역과 그 도보권내 버스정류장들로 구성되어 있고, 17개는 지하철 서비스가 제공되지 않는 지역 중 도보권 범위 내의 버스정류장들로 구성되어 있다.

이러한 기종점 통합과정과 그 범위는 서울시 교통카드 자료를 이용하여 환승가치를 추정한 황보희(2006)의 선행연구와 대체로 일치한다.

다만 서울시 교통카드 자료의 특성상 자료구축시 다음과 같은 가정이 포함되어 있다.

첫째, 철도간 환승시간은 교통카드 자료로부터 얻을 수 없으므로 서울도시철도공사에서 제공하는 역간 환승시간 정보를 이용하였다.

둘째, 버스에서 철도로 환승시 환승시간으로서 버스 하차시간(교통카드자료)과 철도승차시간(교통카드자료) 사이 간격에 철도 대기시간 2.5분(철도 headway의 1/2)을 일률적으로 추가하고, 대신 철도 차내시간에서 2.5분을 제외하였다.

2. 분석결과

효용함수 계수는 전문 통계 프로그램인 LIMDEP ver 7.0을 활용하여 추정하였으며, 대안별 분석결과는 〈표 3〉과 같다.

〈표 3〉 대안별 분석결과

- 대안 1

구분	대안 1-ⓐ		대안 1-ⓑ		대안 1-ⓒ	
	계수	t-통계량	계수	t-통계량	계수	t-통계량
R_m^{in}	-0.01257	-3.42973				
B_m^{in}	-0.10837	-33.8631				
T_m^{in}			-0.11924	-45.4158		
T_m^{out}	-0.06322	-5.09011	0.04807	4.47758		
T_m^{all}					-0.11645	-45.2408
R_m^{ratio}						
n_1	-1.75342	-22.5176	-1.86420	-27.6025	-0.93422	-32.6708
n_2	-3.19323	-19.5667	-3.08964	-21.3108	-1.08443	-17.1170
ρ^2	0.7164		0.6456		0.6401	
$\overline{\rho^2}$	0.7121		0.6414		0.6369	

주 : 대안 1-ⓑ의 경우 환승시간 효용함수 계수가 양수(+)로 분석되어 비합리적인 결과가 산정됨

- 대안 2

구분	대안 2-ⓐ		대안 2-ⓑ		대안 2-ⓒ	
	계수	t-통계량	계수	t-통계량	계수	t-통계량
R_m^{in}	-0.01181	-3.22247				
B_m^{in}	-0.10970	-33.7610				
T_m^{in}			-0.11641	-45.3899		
T_m^{out}	-0.31523	-53.5961	-0.20762	-43.0331		
T_m^{all}					-0.11933	-45.2433
R_m^{ratio}						
n_1						
n_2						
ρ^2	0.7044		0.6264		0.6147	
$\overline{\rho^2}$	0.7018		0.6242		0.6135	

- 대안 3

구분	대안 3-ⓐ		대안 3-ⓑ		대안 3-ⓒ	
	계수	t-통계량	계수	t-통계량	계수	t-통계량
R_m^{in}	-0.04642	-11.9743				
B_m^{in}	-0.08779	-28.1878				
T_m^{in}			-0.08001	-28.0156		
T_m^{out}	-0.12768	-10.0745	-0.14764	-12.0075		
T_m^{all}					-0.08155	-28.7961
R_m^{ratio}	0.01507	20.66240	0.02317	50.04290	0.02227	52.21100
n_1	-1.58715	-20.6922	-1.48993	-20.2285	-1.83919	-46.8483
n_2	-2.50758	-15.5590	-2.11759	-13.8849	-2.85860	-38.3314
ρ^2	0.7261		0.7217		0.7210	
$\overline{\rho^2}$	0.7212		0.7176		0.7177	

- 대안 4

구분	대안 4-ⓐ		대안 4-ⓑ		대안 4-ⓒ	
	계수	t-통계량	계수	t-통계량	계수	t-통계량
R_m^{in}	-0.04672	-12.2882				
B_m^{in}	-0.08780	-28.1606				
T_m^{in}			-0.07909	-27.9941		
T_m^{out}	-0.34155	-55.0340	-0.33943	-54.7501		
T_m^{all}					-0.10370	-36.6447
R_m^{ratio}	0.01561	22.01790	0.02368	52.98990	0.01211	40.14520
n_1						
n_2						
ρ^2	0.7155		0.7108		0.6526	
$\overline{\rho^2}$	0.7121		0.7083		0.6504	

모든 분석대안의 모형적합도 $\overline{\rho^2}$값이 0.61~0.72로 분석되어 모형의 설명력이 높은 것으로 나타났다. 또한 계수들의 t값은 모두 2.58 이상으로 분석되어 통계적으로 유의한 설명력을 갖는다고 볼 수 있다. 한편 모형 계수의 부호 또한 대안 1-ⓑ의 환승시간 변수를 제외하고는 모두 합리적인 것으로 확인되었다.

각 세부 모형계수 분석결과, 대중교통 이용자들은 철도 차내시간에 비해 버스 차내시간의 증가에 민감한 것으로 분석되었고, 1회 환승보다 2회 환승의 페널티가 더 크나 환승횟수 증가에 따라 매회의 환승 페널티는 체감하는 것으로 나타났다. 그리고 철도 통행시간 비율에 대한 계수값은 양수(+)로 분석되어 철도 통행시간 비율이 높은 경로를 대중교통 통행자가 선호한다는 것을 확인할 수 있었다. 한편 대안 2와 4는 환승 페널티를 모형에서 제거하여 환승에 의한 불편익이 환승시간에 포함되는 모형구조를 가지고 있으므로 대안 1과 3에 비해 환승시간에 대한 계수값이 크게 추정되었다.

3. 분석종합

1) 환승시간 가중치

환승시간 가중치는 독립 환승 페널티가 제거된 대안 2와 대안 4 중 수단별 차내시간이 합산된 ⓑ 경우를 이용하여 추정할 수 있으며, 각각 1.8과 4.3으로 확인되었다. 대만의 타이페이에서 이루어진 환승 페널티에 대한 Han(1987)의 연구에 따르면 환승 페널티의 값이 있을 경우 대기시간의 가치는 차내시간의 3배로 분석되었다. 따라서 독립적인 페널티를 제거하면 3배 이상으로 추정되는 바, 본 연구에서는 대안 4-ⓑ에 의한 4.3배를 차내시간에 대한 환승시간 가중치로 도출하였다.

2) 독립 환승 페널티

차내시간에 대한 독립 환승 페널티는 환승횟수 변수를 포함한 대안 1과 대안 3 중 수단별 차내시간이 합산된 ⓑ 경우를 이용하여 추정할 수 있으며, 각각 15.6분(1회), 25.9분(2회)과 18.6분(1회), 26.5분(2회)로 확인되었다. 그러나 대안 1-ⓑ의 경우에는 계수의 부호가 비논리적이므로 본 연구에서는 대안 2의 분석결과인 1회 환승시 18.6분, 2회 환승시 26.5분을 독립 환승 페널티로 도출하였다.

3) 철도와 버스 차내시간 비교

철도는 버스에 비해 통행속도 및 정시성이 높기 때문에 서비스 수준이 더 우수한 대중교통 수단으로 간주할 수 있다. 두 개 수단의 서비스 수준은 두 수단의 차내시간 계수의 차이를 비교함으로써 검토가 가능하다. 각 대안 중 수단별 차내 시간이 구분된 세부 대안 ⓐ의 분석결과를 비교하여 철도에 대한 버스 차내 시간의 가중치를 추정할 수 있으며, 대안 1부터 4까지에 대하여 각각 8.6, 9.3, 1.9, 1.9로 확인되었다.

일반적으로 대중교통 이용객은 철도수단을 우선 선호하고 이와 같은 선호도가 철도 통행시간 비율로 모형에 반영된다고 전제한다면, 대안 3과 대안 4의 모형구조가 합리적인 분석방법이 된다. 이에 따라 철도에 대한 버스 차내시간 가중치는 1.9배로 도출되었다.

4) 최적 효용함수 선정

대중교통 이용자들의 환승기피 현상을 정확하게 반영하기 위해서는 독립 환승페널티를 포함하는 대안 1과 대안 3이 보다 합리적이라고 사료된다. 이 중 대안 1-ⓐ의 경우는 버스와 철도의 차내시간 가중치가 비현실적으로 나타났으며, 대안 1-ⓑ의 경우는 환승시간 계수의 부호값이 비논리적이다.

또한, 대안 1-ⓒ, 대안 3-ⓒ의 경우는 차내시간과 환승시간이 구분되지 못한 한계가 있다. 대안 3-ⓐ의 경우는 철도 차내시간과 철도 통행시간 비율 변수 사이의 상관관계(0.764)가 높게 나타나 다중공선성 문제가 발생

할 수 있는 위험이 있다. 따라서 본 연구에서는 대안 3-ⓑ를 최적 모형으로 선정하였다.

V. 모형의 적용 및 평가

1. 분석대상 및 제약조건 설정

앞서 제시한 알고리즘 및 모형의 활용 가능성을 검토하기 위해 간단한 네트워크에 적용하여 그 분석결과를 검토하였다. 사용된 네트워크는 Spiess와 Florian(1989)이 제시한 최적전략 통행배정모형 설명에 활용된 네트워크를 사용하였다.

1) 시나리오 설정

본 연구의 모형은 수단에 대한 선호가 반영되므로 예제 네트워크에서 버스와 철도수단을 구분함으로써 본 연구 모형의 통행배정 수행능력을 검토하였다. 또한 최대허용 비효용 계수가 분석에 미치는 영향을 검토하기 위해 최대허용 비효용 계수(α)를 적용한 경우와 그렇지 않은 경우를 구분하여 분석을 수행하였다.

〈표 4〉 분석 시나리오 설정

시나리오	버스 수단	철도 수단	최대허용 비효용계수(α)
1	노선1, 노선2, 노선3, 노선4	없음	미고려
2	노선1, 노선3, 노선4	노선2	
3	노선1, 노선2, 노선3, 노선4	없음	고 려
4	노선1, 노선3, 노선4	노선2	

2) 제약조건 설정

(1) 최대허용 비효용 계수

최대허용 비효용 계수를 추정하기 위해 본 연구에서는 앞서 모형계수 추정시 사용한 200개 기종점쌍에 대한 서울시 교통카드 통행자료를 활용하였다.

계수 추정은 식(15)와 같은 가중 평균값을 활용하였으며, 그 값은 $\alpha=2.02$로 분석되었다.

$$\bar{\alpha}=\frac{\sum_i\sum_j Q_{ij}^{\max}\cdot\alpha_{ij}}{\sum_i\sum_j Q_{ij}^{\max}} \quad (15)$$

여기서, $Q_{ij}^{\max}$: i,j간 최대 비효용 경로를 이용한 통행자 수

α_{ij} : i,j간 통행자의 최대허용 비효용 계수($\alpha_{ij}=\frac{Max\{U_{ij}^{all}\}}{Min\{U_{ij}^{all}\}}$)

U_{ij}^{all} : i,j간 선택된 모든 경로의 비효용

(2) 최대허용 환승횟수

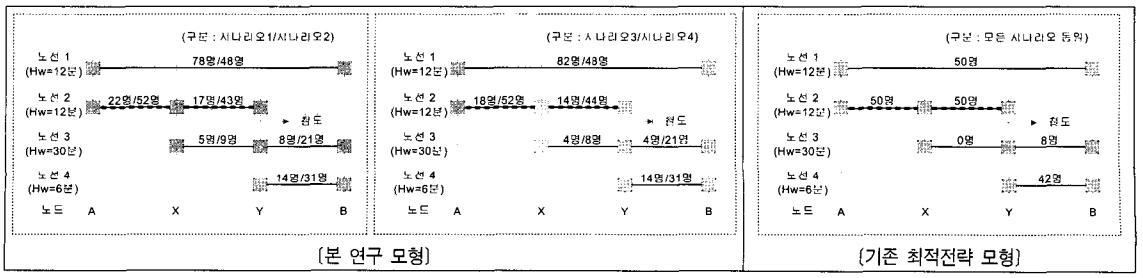
서울시 200개 기종점쌍에 대한 통행자료 분석 결과 98.5%의 통행자는 환승횟수가 2회 이내임이 확인되었으므로, 본 연구에서 최대허용 환승횟수는 2회로 도출하였다.

〈표 5〉 서울시 환승횟수별 통행량 (단위 : 통행)

환승횟수	0회	1회	2회	3회이상	합 계
통 행 수	6,629	3,810	697	172	11,308
통행비율	58.6%	33.7%	6.2%	1.5%	100.0%
누적통행수	6,629	10,439	11,136	11,308	-
누적통행비율	58.6%	92.3%	98.5%	100.0%	-

2. 통행배정 결과

예제 네트워크를 대상으로 기점 A와 종점 B의 통행량을 100명으로 가정하였다. 기존 최적전략 모형 적용시, 환승시간 가중치는 본 연구결과에서 제시된 4.3(모형



〈그림 4〉 시나리오별 통행배정 결과

4-ⓑ)을 적용하였다. 모형별 시나리오별 통행배정을 수행한 결과는 〈그림 4〉와 같다.

3. 기존 연구와 비교

본 연구 모형의 적절성 및 개선효과를 검토하기 위해 기존의 대표적인 대중교통 통행배정 모형인 최적전략 통행배정 모형과 비교하였다.

철도수단을 제외한 본 연구의 시나리오 1, 3과 최적전략 배정결과를 비교하면, 본 연구 결과에 비해 최적전략의 경우는 직결 경로인 노선 1의 이용수요가 낮게 추정되었다. 이는 기존 모형이 환승을 기피하는 대중교통 이용자의 행태를 정확하게 반영하지 못한 한계를 보여준다. 즉, 기존 모형은 최적전략 탐색후, 경로별 배정단계에서 단순히 노선의 배차횟수(frequency)만을 기준으로 배정하게 되어 환승경로에 상대적으로 많은 배정이 이루어지는 단점이 있다. 그러나 독립환승 페널티를 반영한 본 모형에서는 이와 같은 불합리성이 개선되는 결과를 확인할 수 있다.

철도수단을 포함한 경우, 기존 모형은 이용자들의 수단 선호특징을 반영하지 못해 모든 시나리오에 대해 동일한 결과를 제시해 주었다. 그러나 본 연구 모형에서는 시나리오 1, 3과 시나리오 2, 4가 서로 다른 결과를 보여주고 있으며, 철도노선이 포함된 경로에 통행량이 많이 배정되는 것을 확인할 수 있어 이용자들의 수단선호가 모형에 반영되어 있다.

분석결과 중 네트워크 전체 통행시간을 살펴보면, 본 연구의 시나리오 2와 4는 각각 시나리오 1과 3에 비해 총통행시간이 다소 증가하였는데 이는 이용자들이 통행시간이 다소 증가하더라도 철도수단을 선호하는 특성에 기인한다.

〈표 6〉 효용함수 및 통행시간 비교

구 분	시나리오 1	시나리오 2	시나리오 3	시나리오 4	최적전략
효용함수	-340.0	-337.6	-325.1	-334.4	-387.6
통행시간(분)	3,175	3,275	3,134	3,262	3,198

주 : 효용함수 계수는 모두 최적모형 수치를 적용함

전체 네트워크 효용을 기준으로 분석결과를 검토하면, 기존 연구에 비해 본 연구의 경우 비효용이 12.3%~19.2% 감소한 것을 확인할 수 있다. 이는 최적전략 모형의 경우 환승경로에 상대적으로 많은 배정이 이루어지는데 따른 비효용함수값 증가 때문에 나타난 결과이다.

한편 최대허용 비효용 계수를 고려한 시나리오 3과 4는 시나리오 1과 2에 비해 불합리한 경로제외에 따라, 전체 네트워크 비효용이 낮은 것을 확인할 수 있으며, 기존 모형과의 상대적인 차이도 크다는 것을 확인할 수 있다.

V. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 환승에 민감한 대중교통 이용자들의 특성을 반영할 수 있는 확률적인 대중교통 통행배정모형을 구축하였다. 경로선택을 위한 선택대안은 환승횟수를 기준으로 철도와 버스 수단을 복합적으로 고려한 총 8개로 구분하였으며 경로 선택확률은 다항로짓모형을 활용하였다.

다항로짓모형의 계수 추정에 있어서는 SP 자료가 아닌 서울시 대중교통 이용자들의 RP 자료를 활용함으로써 보다 현실적인 모형 구축이 가능했으며 추정된 모형의 설명력도 높게 분석되었다. 효용함수 계수분석을 통한 환승시간 가중치는 차내시간에 4.3배로 분석되었으며, 독립 환승 페널티는 1회 환승시 18.6분, 2회 환승시 26.5분으로 분석되었다. 또한 철도 차내시간에 대한 버스 차내시간의 가중치는 1.9배로 나타났다.

최적 모형은 차내시간 및 환승시간, 철도 통행시간비율을 반영한 모형이 선택되었다. 최적 모형은 독립환승 페널티를 포함하고 있어 환승에 민감한 통행자들의 행태를 모사할 수 있으며, 철도와 버스 수단의 선호차이를 모형에 반영할 수 있는 구조를 가지고 있다.

간단한 네트워크에 적용결과, 대중교통 이용자들의 환승기피 행태가 반영된 결과를 제시해 주었으며, 버스보다 철도 수단을 선호하는 통행패턴을 모사할 수 있어 기존 모형보다 현실적인 추정 결과를 나타냈다.

그러나 본 연구 수행과정에는 다음의 한계점이 있으며 이는 향후 지속적인 보완이 필요하다.

첫째, 본 연구 모형을 보다 대규모 네트워크에 적용하여 분석결과를 검증하는 것이 필요하며, 실제 통행량 자료를 기준으로 모형의 정확성을 검증하는 연구가 추가되어야 된다.

둘째, k-path 알고리즘을 적용한 가능 경로 탐색과정에서 나타날 수 있는 중복노선에 의한 배정결과의 비합리성을 개선하는 연구가 추가되어야 한다.

마지막으로, 본 연구에서 활용한 교통카드 자료로는 차내혼잡을 파악할 수 없어, 대중교통 이용객의 경로선택 과정에서 중요한 변수인 혼잡에 대한 반영이 이루어지지 못한 한계점이 있다.

참고문헌

1. 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
2. Ben-Akiva, M. and S. R. Lerman(1987), "Discrete Choice Analysis"
3. Han A.(1987), "Assessment of Transfer Penalty to Bus Riders in Taipei: A Disaggregate Demand Modeling Approach," Transportation Research Record 1139 pp.8~14
4. Kanafani, K.(1983), "Transportation Demand Analysis", McGraw-Hill
5. Ortuzar J. de D., L. G. Willumsen(1990), "Modelling Transport", John Wiley & Sons
6. Sheffi, Y.(1985), "Urban Transportation Network", Prentice Hall
7. Spiess, H. and Florian, M.(1999), "Optimal Strategies : A New Assignment Model for Transit Networks", Transportation Research Part B, Vol.3, No.2, pp.83~102
8. Yen, J.Y.(1971), "Finding the k Shortest loopless paths in a network. Management Science 17. pp.712~716
9. 노정현(1999), 교통계획 통행수요이론과 모형, 나남출판
10. 박경철(2006), "대중교통 네트워크 통합 설계 모형 개발", 서울대학교 대학원 박사학위논문
11. 양창화, 손의영(2000), "서울시 지하철 이용객의 환승 관련 변수의 가치 추정", 대한교통학회지 제18권 제4호, pp.19~30
12. 윤대식(1999), "통근통행 이전의 비통근통행 발생여부와 교통수단 선택행태 분석", 대한교통학회지 제17권 제5호, pp.57~65
13. 윤대식(2002), "교통방송이 제공하는 교통정보가 직장인의 통행행태에 미치는 영향 분석", 대한교통학회지 제20권 제5호, pp.33~43
14. 윤혁렬(2000), "용량을 고려한 대중교통 통행배정 모형 구축에 관한 연구", 서울대학교 대학원 박사학위논문
15. 이신해(2002), "대중교통 통행배정모형 개발 및 통행량 기반 대중교통 기종점통행량 추정", 서울대학교 대학원 박사학위논문
16. 이재섭, 김익기(1999), "대중교통 수단간의 환승을 고려한 확률통행배정 기법의 개발", 대한교통학회 제36회 학술발표대회 논문집, pp.261~266
17. 이재섭, 김익기(2001), "다이알 알고리즘을 이용한 다수단 대중교통 노선배정기법에 관한 연구", 대한교통학회지, 제19권 제2호, pp.53~60
18. 임강원, 임용택(2003), 교통망분석론, 서울대학교 출판부
19. 황보희(2006), "서울시 대중교통 이용객들의 환승시간가치 추정에 관한 연구", 한양대학교 대학원 석사학위논문

♧ 주 작 성 자 : 박경철
♧ 교 신 저 자 : 박경철
♧ 논문투고일 : 2007. 2. 24
♧ 논문심사일 : 2007. 3. 30 (1차)
2007. 4. 17 (2차)
♧ 심사판정일 : 2007. 4. 17
♧ 반론접수기한 : 2007. 10. 31