관측 교통수단 분담률 자료를 활용한 도시철도 신설 후 수단분담률 예측분석 기법

서동정¹ · 김익기^{2*} · 이태훈²

¹ 한국철도기술연구원 교통체계분석연구단, ² 한양대학교 교통물류공학과

A Technique of Forecasting Market Share of Transportation Modes after Introducing New Lines of Urban Rail Transit with Observed Mode Share Data

SEO, Dong Jeong¹ · KIM, Ikki^{2*} · LEE, Tae Hoon²

¹ Transport Systems Research Team, Korea Railroad Research Institute, Gyeonggi 437-050, Korea

² Dept. of Transportation & Logistics Eng., Hanyang University-ERICA campus at Ansan,
Gyeonggi 426-791, Korea

Abstract

This study suggested a method of forecasting market-share of each mode after introducing new urban rail transit lines. The study reflected the observed market share of presently operating urban rail transit into forecasting process in order to improve accuracy in predicting market share of each modes. For more realistic representation of the forecasting model, we categorized O/D pairs according to attributes of trip distance, access time and number of transfers. The analysis results of traveler's mode choice behavior with observed data showed that the trip distances are longer, the share of urban rail tends to be higher, and that the number of transfers is fewer and the access times are lesser, the share of urban rail also tends to be higher. Then, incremental logit model was used in estimating mode choice probabilities for O/D pairs along with rail transit lines while utilizing observed market shares of each modes and differences in transit service level. As the next step, the market share of rail transit after introducing new rail transit lines was forecasted by using incremental logit model with the initial share values calculated the previous analysis step. It also reflected changes in level of service for automobile in highway due to changes in highway systems and changes in mode shares after introducing new lines of rail transit. It can be expected that the proposed method would more realistically duplicates phenomena of mode choice behavior for rail transit and that it would be more theoretically logical than the typical existing methods using SP data and incremental logit model or using additive logit model in this country.

본 연구는 기존 도시철도 운영 하에서 관측된 교통수단 분담률을 반영하면서 추가적인 도시철도 신설노선 완공 후 수단분담률을 추정하는 방법론을 제안하였다. 통행자의 도시철도 이용 패턴을 현실적으로 반영하기 위해 관측된 표본자료를 기반으로 전수화된 수단별 O/D 자료를 통행거리, 접근시간, 접근유형(환승 횟수)에 따라 카테고리화 하여 수단분담률을 분류하였다. 수단선택 분석 기법으로는 관측된 수단분담률에 기초하는 점진적 로짓모형을 이용하였다. 도시철도 이용 패턴을 카테고리화 하여 분석한 결과, 장거리 통행이거나 환승이 적을수록 도시철도 수단분담률이 높았으며, 또한 도시철도 역에 접근시간이 작을수록 역시 도시철도 수단분담률이 높은 결과를 관측 자료인 기존연도 O/D 자료에서 분석되었다. 기존 도시철도 서비스 수준 하에서의 교통수단 분담률을 기본 자료로 하고, 신설 노선으로 제공되는 도시철도 서비스 수준과 카테고리화 된 도시철도 서비스 수준의 차이를 점진적 로짓모형에 적용함으로써 신설 도시철도가 제공하는 서비스 수준 하에서의 교통수단 분담률을 추정하였다. 이와 같이 추정된 잠정적 교통수단 분담률을 기초로 기존연도와 예측연도의 교통환경 변화를 반영하여 점진적 로짓모형을 분석함으로써 모든 교통수단의 장래 수단분담률을 예측 분석하는 방법론을 제시하였다. 본 연구에서 제안한 방법론은 기존 SP 자료의 적용이 어려운 경우 활용 가능하며, 기존 도시철도의 분담률 자료가 확보된 상황에서 가볍적 로짓모형의 적용보다 이론적, 논리적 측면에서 더욱 우수하다고 고려된다.

Key Words

Urban Rail, Incremental Logit Model, Zone Division, Transfer, Trip Distance, Access Time
도시철도, 점진적 로짓모형, 존 세분화, 환승, 통행거리, 접근시간

* : Corresponding Author
ikkikim@hanyang.ac.kr, Phone: +82-31-400-5152, Fax: +82-31-406-6290

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

도시철도사업은 교통수단 간 전환교통량을 예측하는 것이 교통수요 분석과정에서 매우 중요하다. 현재 도시철도 신설에 따른 수단분담률 추정에는 SP 자료를 이용한 다항로짓모형(multinomial logit model) 또는 점진적 로짓모형(incremental logit model)이 이용되고 있다.

SP 자료의 사용은 가상적인 상황에 대한 응답에 기초함으로 설문에서 응답한 답변과 실제 행동의 결과가 반드시 일치하지 않을 수 있다(원제무, 2001). 이와 관련하여 Ben-Akiva and Morikawa(1990), 김익기(1998), Louviere, Hensher and Swait(2000) 등 SP 자료의 RP/SP 결합모형 연구가 늘어나고 있지만, 자료 수집과 예측 활용성 측면에서 현실적 적용의 어려움이 존재한다.

현재 '도로·철도 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완 연구(이하 예타 지침서)'는 과거 수단선택 모형 정산의 문제점인 더미변수의 영향력을 감소시키고자 점진적 로짓모형을 사용하도록 권장하고 있다. 그러나 점진적 로짓모형은 신교통수단 건설과 같이 특정 O/D 쌍에 초기 관측 수단분담률이 없으면 예측에 바로 적용하기 어렵다. 이를 위해 현재 예타 지침서는 이론적으로 한계성을 가지고 있음에도 가법적 로짓모형(additive logit model)을 제한적으로 적용할 것을 제시하고 있다.

따라서 본 연구는 기존 방법이 가진 단점을 극복하기 위해 관측된 교통수단 분담률을 기반으로 추가적인 도시철도 신설노선 완공 후 교통수단 분담률을 추정하는 방법론을 제안하고자 한다. 또한 대중교통 존 세분화와 도시철도 통행 특성을 카테고리화하여 도시철도 신설에 따른 수단분담률 예측 정확성을 향상시키고자 하였다.

2. 연구의 범위 및 내용

본 연구는 기존 도시철도가 운영되고 있는 지역의 관측 교통수단 분담률을 활용하여 도시철도 신설로 인한 교통수단 분담률의 변화를 예측하는 방법론을 제시하고자 한다. 분석의 공간적 범위는 도시철도의 특성을 고려하여 노선의 영향을 받는 해당 도시의 내부로 한정한다. 사례 연구지역으로는 광주광역시를 대상으로 분석하였다. 현실적인 대중교통 이용자의 통행패턴을 반영하기 위한 본 연구의 내용은 다음과 같다.

먼저 접근수단을 고려한 대중교통 존 세분화의 수행방법을 정리하였다. 다음으로, 관측된 표본자료를 기반으로 전수화된 수단별 O/D 자료를 접근유형(환승 횟수), 통행거리, 접근시간에 따라 카테고리화하여 도시철도 이용패턴의 분석 방법을 정리하였다. 마지막으로 카테고리별 수단분담률과 점진적 로짓모형을 이용하여 장래 도시철도 신설에 따른 분담률 추정 방법을 정리하였다.

II. 기존문헌고찰

1. 도시철도 수요예측 향상을 위한 기존연구

도시철도 수요추정 모형의 예측력 향상을 위해 크게 도시철도 통행패턴과 수요추정 모형의 정확성 향상기법과 관련된 연구가 진행되어 왔다. 대부분의 연구에서 행정동 단위의 도시철도 통행배정 결과 값과 실측치의 차이가 크게 존재함을 인식하고 있다.

손의영 외(2009)는 이러한 문제 해결을 위해 센트로이드의 추가, 센트로이드 커넥터 길이의 조정을 통한 수요추정의 예측력 향상 기법을 제시하였다. 조항웅 외(2010)는 도시철도역을 중심으로 한 거리별 수단선택행태와 관련하여 설문조사를 통해 역 간 거리가 짧은 역은 역세권이 500m, 역 간 거리가 긴 역은 역세권이 1,000m로 역세권의 적정 반경 거리를 제시하였다.

도시철도 수요추정 모형의 정확성 향상기법과 함께 도시철도 이용과 통행거리의 상관관계와 관련된 연구도 진행되었다. 설유진과 전경수(2006)는 수도권 외 2개의 광역 도시의 수단분담률 분석을 통해 통행거리가 증가함에 따라 승용차의 분담률은 낮아지고, 버스와 도시철도의 분담률은 증가하는 경향을 파악하였다. Joachim Scheiner(2010)는 독일 통행조사 자료를 이용하여 도시거주인구가 50만 이상인 대도시권에서 통행거리가 7km에서 10km 이상일 때 대중교통을 이용하는 이용객 수가 많이 증가한다고 분석하였다.

SG Associates, Inc and Volpe National Transportation System Center(1998)는 <Table 1>과 같이 대중교통 수요예측의 정확성 향상을 위해 대중교통 수단별, 접근유형별로 존을 세분화하는 방법을 구체적으로 제시하였다. 대중교통 이용자가 도보로 접근할 수 있는 거리를 기준으로 크게 walk access와 drive access 존을 구분하는 방법과 short-walk, long-walk, drive only로 존을 세분화하는 방법을 제안하였다.

〈Table 1〉 Examples of Subdividing a TAZ into Several Market Segments Depending on Types of Transit Access

Types	Example of Market Segment
Walking Access from a Zone Bordered by Multiple Bus Routes
Walking Access from a Zone Served by Both Bus and Rail

Source : SG Associates, Inc and Volpe National Transportation System Center, 1998

2. 점진적 로짓모형

점진적 로짓모형은 요금, 통행시간 등의 특정 수단 속성과 서비스수준 변화로 인한 수요의 변화를 기존의 시장 분담률과 사전에 추정된 계수 값을 이용하여 빠르게 분석할 수 있는 기법이다. 따라서 점진적 로짓모형은 현재 시장 분담률(market share)과 서비스수준 변화량 자료를 이용하여 장래의 수요 변화를 추정할 수 있다. Kumar(1980)는 다항로짓모형에 대한 일반적인 점진적 로짓모형의 형태를 아래와 같이 제시하였다.

$$p'_k = \frac{p_k^0 \exp(V_k - V_k^0)}{\sum_j p_j^0 \exp(V_j - V_j^0)} \quad (1)$$

여기서,

$$\begin{aligned} p'_k &: \text{수단 } k \text{의 새로운 수단분담률} \\ p_k^0 &: \text{수단 } k \text{의 기존 수단분담률} \\ (V_k - V_k^0) &: \text{수단 } k \text{의 효용 변화} \end{aligned}$$

Koppelman(1983)과 Bates et al(1987)는 계층적 로짓구조(nested logit 혹은 hierarchical logit)에서 적용할 수 있는 확장된 점진적 로짓모형(extended incremental logit model: EIL)을 제시하였다. 〈Figure 1〉은 Bates et al(1987)가 제시한 계층적 로짓구조의 예시이다.

철도의 신설로 변화된 전체 대중교통 수단의 분담률

〈Figure 1〉 Example of Bates's Hierarchical Logit Model Structure

(P'_{PT})은 기존 대중교통 수단(버스)의 효용치(U_{XT})와 새로운 대중교통 수단(철도)의 도입으로 변화된 각 수단의 효용치(U'_{XT}, U'_{NT}), 시행 전 대중교통 선택비율(P_{PT})을 점진적 로짓모형에 적용하여 산출하게 된다. 여기서, 상위계층에서의 대중교통 수단분담률은 식(2)와 같다.

$$P'_{PT} = \frac{P_{PT} \cdot [\exp(U'_{NT} - U_{XT}) + \exp(U'_{XT} - U_{XT})]^\Phi}{P_{PT} \cdot [\exp(U'_{NT} - U_{XT}) + \exp(U'_{XT} - U_{XT})]^\Phi + [1 - P_{PT}]} \quad (2)$$

여기서,

$$\begin{aligned} P'_{PT} &: \text{시행 후 대중교통 선택 비율} \\ P_{PT} &: \text{시행 전 대중교통 선택 비율} \\ U'(U) &: \text{시행 후의 효용치} \\ XT &: \text{기존 대중교통 수단(bus)} \\ NT &: \text{새로운 대중교통 수단(rail)} \\ \Phi &: \text{inclusive value (logsum)} \end{aligned}$$

하위계층에서의 버스와 철도의 수단분담률은 각각 식(3), 식(4)와 같다.

$$P'_{XT} = \frac{\exp(U'_{XT} - U_{XT})}{\exp(U'_{NT} - U_{XT}) + \exp(U'_{XT} - U_{XT})} \cdot P'_{PT} \quad (3)$$

$$P'_{NT} = \frac{\exp(U'_{NT} - U_{XT})}{\exp(U'_{NT} - U_{XT}) + \exp(U'_{XT} - U_{XT})} \cdot P'_{PT} \quad (4)$$

만약 대중교통을 제외한 교통수단의 효용 변화가 없을 경우 비대중교통수단(M)의 수단분담률은 식(5)와 같다.

$$P'_M = P_M \cdot \frac{1 - P'_{PT}}{1 - P_{PT}} \quad (5)$$

이러한 점진적 로짓모형을 도시철도 정책분석에 활용한 기존 연구로는 김익기 외(2006)가 제시한 연구가 존재한다. 김익기 외(2006)는 점진적 로짓모형을 이용하여 복합대중교통체계에서 환승을 명확하게 반영하면서 신고

통수단의 수요를 분석할 수 있는 분석기법을 제안하였다.

대중교통 수요예측의 정확성 향상을 위해 대중교통 존 세분화에 관한 연구와 점진적 로짓모형의 활용과 관련된 연구가 진행되어 왔다. 그러나 아직 모든 교통전문가가 공감할 수가 있는 정형화된 방법은 정착되어 있지 않은 상태이다.

본 연구는 기존 O/D 자료를 활용하여 통행패턴을 카테고리화 하고, 기존 노선의 서비스 속성과 신설노선으로 새롭게 제공될 서비스 속성을 점진적 로짓모형에 적용하여 도시철도 신설에 따른 수단분담률을 추정하는 방법을 새롭게 제안하고자 한다.

III. 분석방법론

본 연구에서 제안한 분석방법은 크게 (단계 1) 기존 O/D를 이용하여 카테고리별 평균적 교통수단 분담률을 산출하는 단계, (단계 2) 카테고리별 도시철도 기준 서비스와 신설될 도시철도 서비스의 차이를 반영하는 단계, (단계 3) 사업시행과 미시행 간의 서비스 변화를 점진적 로짓모형을 이용하여 사업시행 최종 수단분담률을 예측하는 단계로 구분된다.

본 연구에서 분석한 방법은 아래의 흐름도와 같이 요약될 수가 있다.

1. 교통존 세분화와 대중교통 네트워크 구축

국내 교통수요 분석에서는 교통존 범위를 행정동 기반으로 대부분 설정하고 있다. 이는 분석에서 요구되는 사회경제지표와 기타 관련 자료가 주로 행정동을 기반으로 구축되어 자료 수집이 용이하기 때문이다. 그러나 도시철도를 포함한 대중교통 수요분석에서는 행정동 단위의 교통존으로는 각 교통존의 센트로이드에서 정거장(버스정류장 또는 도시철도역)까지의 접근 패턴을 현실적으로 표현하는데 어려움이 존재한다. 이와 같은 도시철도역까지의 접근 패턴에 대한 묘사력 부족은 도시철도 수요예측의 부정확성과 직접적으로 연결된다.

행정동 단위의 교통존으로 도시철도 수요분석을 수행할 때 가장 큰 문제점은 하나의 교통존에 두 개 이상의 도시철도역이 존재하는 경우이다. 이 경우 대중교통 노선배정에서 최단경로에 해당하는 하나의 역사로 통행이 집중되는 현상이 발생한다. 이로 인해 실제 역별 승차차 이용객 수와 일치하지 않는 통행배정 결과가 발생하여 대중교통 이용 패턴을 현실적으로 설명하지 못하게 된다. 따라서 하나의 역사에 접근체계가 합리적인 하나의 교통존으로 존을 세분화하는 것이 필요하다.

대중교통 존 세분화에서 고려해야 할 사항은 통행자가 정류장 및 철도역에 접근하는 행태에 대한 반영이다. 도로로 바로 접근할 수 있는 승용차와 다르게 도시철도 이용은 역으로 접근하기 위해 도보 또는 버스와 같은 접근수단(feeder)을 이용하게 된다. 도보를 이용한 역사의 접근거리는 각 연구 별로 차이가 존재하나 400m~1,000m 범위 내에 있는 것으로 기존 연구에

서 제시하고 있다.¹⁾ 이러한 도보 접근거리를 대중교통 네트워크에서 고려하기 위해 센트로이드의 위치와 센트로이드로부터 정거장까지의 도보거리가 반영된 센트로이드 커넥터의 반영이 필요하다. 이 과정에서 도보에 의한 접근과 택시, 버스와 같은 접근수단을 이용한 접근으로 구분하여 SG Associates, Inc and Volpe National Transportation System Center(1998)에서 제시한 것과 같이 도시철도 역에 접근하는 방법에 따라 지역을 구분하여 교통존을 세분화하는 과정이 필요하다.

본 연구는 KTDB에서 제공하고 있는 광주광역시권 네트워크 자료를 기반으로 대중교통 네트워크를 수정, 재구축을 하였다. 교통존 세분화를 위한 기본적 원칙은 다음과 같다. 첫째, 도보 가능한 지역은 하나의 교통존에 같은 노선 상의 철도역이 하나만 연결될 수 있도록 구분한다. 둘째, 도시철도역과 한계 도보거리보다 멀리 존재하는 교통존은 도로 네트워크에 의해 최단경로를 이용하는 접근교통수단으로 연결한다. 즉, 센트로이드에 인접한 하위 기능위계의 도로에 센트로이드 커넥터를 연결하여 비논리적인 역별 통행배정량을 최소화시킬 수 있도록 수정한다. 셋째, 세분화 된 교통존의 통행유출 및 유입 통행량은 세분화되기 전 행정동 단위의 교통존 내 인구 밀도는 균일하다는 가정에 따라 세분화 된 존의 면적비율을 기준으로 배분한다. 넷째, 도시철도 역사가 행정동 경계에 걸쳐진 경우 역사 인근에 있는 여러 교통존에서 접근 가능하도록 네트워크를 구축한다.

〈Figure 2〉는 기존 네트워크에 위의 사항을 반영하여 실제로 존 세분화를 수행한 예시이다.

〈Figure 2〉 Comparison between Original KTDB Zone System and Subdivided Zone System

1) 국내 주요 연구에서는 배준구(1982)는 역세권을 약 1km로 보았으며, 김대웅 외(2002)는 설문조사를 통해 도보 역세권을 반경 530m로 제시하였다. 국외에서는 일본의 경우 역사의 등급에 따라 360m, 540m, 720m로 설정하고 있으며, 미국의 경우에는 주(state) 마다 차이가 존재하나 500m~1,400m로 설정하고 있다.

2. 도시철도 이용 패턴의 카테고리화

관측 표본자료를 기준으로 전수화하여 구축된 KTDB의 광주광역시권 기준연도 O/D를 이용하여 대중교통 이용 패턴을 분석하였다. 여기서, 기준연도는 한국교통연구원에서 배포한 연도별 O/D 중 가구통행실태조사에 기초한 최초연도를 의미한다. 도시철도 이용패턴 분석 결과, 접근유형(환승 횟수), 통행거리, 접근시간이 교통수단 분담률에 영향을 주는 요소로 파악되었다. 세 가지 요소를 기준으로 도시철도 이용패턴을 카테고리화 하여 자료로부터 평균적 교통수단별 분담률을 산출하였다. 각 카테고리에 대한 세부적인 구분 기준은 다음과 같다.

먼저 특정 반경 내에 센트로이드가 존재하면 도시철도로 직접 접근이 가능한 '직결' 유형으로 고려하였으며, 아닌 경우는 접근교통수단(feeder)에 의해 도시철도역에 접근하는 '환승' 유형으로 구분하였다. 여기서 직결존과 환승존 구분을 위한 특정 반경은 기본적으로 도보를 통해 접근할 수 있는 거리를 기준으로 한다. 그러나 도보 접근시간이나 버스를 이용한 접근시간이 유사하여 통행자들이 역에 접근하는 저항 정도의 인지가 크게 다르지 않다면 도시철도를 이용하는 성향이 도보통행과 유사하다고 가정하고 분석가의 판단에 따라 반경거리를 조절할 수 있다. <Figure 3>은 도시철도역의 접근유형에 따른 카테고리를 개념적으로 나타낸 것이다.

본 연구는 광주광역시권 네트워크 및 O/D자료를 이용하여 사례분석을 수행하였다. O/D 간 통행거리에 의한 카테고리 구분은 3km 이하, 3km ~ 8km, 8km 이상으로 설정하였으며, 도시철도 역까지의 접근시간에 의한 카테고리 구분은 10분 이하, 10분 ~ 20분, 20분 이상으로 설정하였다. 여기서 O/D 간 통행거리와 접근시간은 최단경로를 이용한다는 가정하에 O/D 간 최단경로 결과 값을 사용하였다.

분석결과 <Table 2>와 같이 직결 O/D 유형에서 통행거리가 8km 이상일 때 도시철도의 분담률은 64.3%로 가장 높았으며, 1회 환승 O/D 유형에서도 통행거리가 8km 이상 일 때 44.5%로 비교적 높은 도시철도 분담률이 나타났다. 즉, 8km 이상의 장거리 통행에서는 도시철도를 비교적 높은 비율로 선택하는 것으로 나타났다. 또한 통행거리가 3km 이하인 경우 승용차 분담률이 높은 것으로 분석되었다. 2회 환승 O/D 유형은 사례연구 지역인 광주광역시외의 기존 철도 O/D에서 카테고리의 표본이 충분하지 않아 수단분담률 산정에서 제외하였다.

<Table 2> Transportation Mode Shares by Category in the Base Year at Kwangju Metropolitan Area
(Unit : %)

Category			Auto mobile	Bus	Taxi	Urban Rail
Access Type	Travel Distance (km)	Access Time (min)				
No Transfer	≤ 3	-	43.4	25.9	23.0	7.7
	3 ~ 8		34.4	28.7	13.2	23.7
	≥ 8		23.1	10.6	2.0	64.3
One Transfer	≤ 3	10~20	56.5	18.8	17.3	7.4
	3 ~ 8	10~20	62.2	21.6	3.8	12.5
	≥ 8	10~20	40.6	5.3	9.6	44.5

<Figure 3> Access Types to Urban Rail Stations

3. 점진적 로짓모형을 이용한 분석방법

본 연구에서 제안한 분석방법에서 단계2와 단계3은 분석기법으로 점진적 로짓모형을 사용한다. 단계2는 카테고리별 평균적인 도시철도 서비스 수준과 신설 노선 추가로 제공되는 도시철도 서비스 수준의 차이를 점진적 로짓모형으로 분석하여 신설 도시철도의 교통수단 분담률을 추정한다. 그리고 단계3은 단계2의 분석결과를 입력 자료로 하여 사업시행에 따른 토지이용 및 교통 환경변화를 점진적 로짓모형으로 분석하여 모든 교통수단의 장래 수단분담률을 예측한다.

점진적 로짓모형의 효용함수에 사용되는 총통행시간은 통행배정 결과 값을 사용하였다. 즉 도로부문은 분석 연도별 도로 네트워크(highway network)에 통행배정으로 얻은 경로통행시간을 사용하였으며, 철도부문은 대중교통 노선배정으로 얻은 차내시간과 차외시간을 적용하였다. 여기서 차외시간은 접근시간, 대기시간, 환승시간을 모두 포함한 시간을 의미한다.

〈Figure 4〉 Simple Network for Calculation Example

〈Table 3〉 Number of O/D Trips and Market Shares by Modes between Zone 1 to Zone 3

Mode	No. of Trips (person)	Existing Shares(%)	Parameter Value for Travel Time in Utility Function
Automobile	93	52.2	-0.05
Bus	70	39.3	
Taxi	15	8.4	
Urban Rail	0	0.0	

각 단계별로 분석방법의 계산 과정을 명확하게 표현하기 위해 〈Figure 4〉와 같이 세 개의 존으로 구성된 단순네트워크를 이용하였다. 단순 네트워크는 기존의 도시철도가 있는 구간(존1→존2 O/D쌍)과 신설 도시철도로 연결된 구간(존1→존3 O/D쌍)으로 구성된다. 계산과정에서의 핵심은 도시철도 신설로 새롭게 연결되는 존1→존3 O/D쌍에 대해 신설 도시철도 부담률의 예측 계산과정을 단계별로 제시하는 것이다.

존1→존3 O/D쌍에 대한 세부 통행조건은 〈Table 3〉과 같이 설정하였다. 그리고 기준연도 카테고리별 평균적 수단부담률은 광주광역시의 분석 결과를 사용하였다.

1) 단계1: 카테고리별 평균적 교통수단 부담률 산출

관측 자료에 기반을 둔 기준연도 O/D자료를 이용하여 접근유형(환승 횟수), 통행거리, 접근시간의 카테고리별 평균 수단부담률을 산정하기 위해서는 각 카테고리의 분류 기준이 설정되어야 한다. 카테고리 분류 기준 값은 해당 도시의 교통여건과 도시의 규모에 따라 다를 수 있으므로 분석하고자 하는 도시의 자료를 기준으로 현황 패턴에 맞추어 설정한다. 카테고리의 분류 기준 값이 설정되면 다음과 같이 분석을 수행한다.

첫째, 기준연도 O/D자료를 이용하여 개별 O/D쌍의 접근유형(환승 횟수), 통행거리, 접근시간 값을 산출한다. 접근유형(환승 횟수)은 도시철도 역을 기준으로 반

경거리 내부존(직결존)과 반경거리 외부존(환승존)으로 구분하여 유형을 정의한다. 통행거리는 존간 최단경로의 통행거리로 정의한다. 접근시간(또는 접근거리)은 네트워크의 각 센트로이드와 도시철도 역의 최단 접근거리(접근시간)를 산출하고, O/D쌍별 접근거리(기점 접근거리와 종점 접근거리의 합)를 산정한다.

둘째, 산출된 각 속성 값을 이용하여 개별 O/D쌍이 어떤 카테고리에 해당하는지를 결정한다. 다음으로 카테고리별 평균적 교통수단 부담률 값을 산출한다. 산출된 결과 값은 불합리하게 계산될 수도 있으므로 카테고리 구분에 따른 수단부담률 패턴이 현실적 관측 자료와 비교하여 적합한지 검증하는 절차가 필요하다.

셋째, 장래 도시철도 신설 노선을 반영한 네트워크와 장래 O/D자료를 이용하여 예측연도의 각 O/D쌍이 어떤 카테고리 유형에 속하는지를 분류한다. 여기서 예측연도의 카테고리 유형 분류기준과 속성 산출방법은 기준연도와 동일한 방법으로 산출한다.

넷째, 예측연도의 각 O/D쌍이 해당하는 카테고리 유형에 해당 카테고리의 평균적 도시철도 부담률을 부여한다. 타 교통수단의 부담률은 기존 부담률 비율에 따라 추정된 도시철도 부담률 만큼 통행이 도시철도로 전환한 것으로 가정하고 교통수단별 부담률을 산출하여 초기 값으로 사용한다. 그러나 다음과 같은 경우는 해당 O/D쌍의 관측된 수단부담률 값을 그대로 사용하는 것이 카테고리별 평균적 교통수단 부담률을 적용하는 것보다 오류가 적을 것으로 본 연구에서는 판단하였다.

- 기존에 이미 존재하고 있는 도시철도 노선으로 연결되는 직결 O/D쌍
- 관측된 도시철도 수단부담률이 도시철도 신설 후 해당 카테고리의 평균 수단부담률 보다 큰 O/D쌍
- 관측 수단부담률에서 도시철도 부담률이 0이고, 예측연도 도시철도 신설 후에도 총 접근거리/직선거리 비율이 1.0 이상인 O/D쌍

〈Figure 5〉는 접근거리/직선거리 비가 1.0 이상인 O/D쌍의 개념을 가상 네트워크로 보여주는 그림이다. 이와 같은 경우는 도시철도에 접근하는데 소요하는 시간이 총 통행시간에서 차지하는 비율이 지나치게 높다. 따라서 도시철도를 이용하기보다는 타 수단을 이용할 가능성이 매우 크기 때문에 관측 부담률과 같이 0 값을 그대로 적용한다.

〈Figure 6〉과 같은 가상 네트워크와 통행 조건을 가

〈Figure 5〉 Example of the Ratio of Access Distance to Air-Line Distance over 1.0

〈Figure 6〉 A Specific Example of the Simple Network for a Category

지고 단계1을 수행하면 존1→존3 O/D쌍의 초기 수단분담률은 〈Table 4〉와 같이 산출된다. 즉 〈Table 2〉를 기준으로 해당 카테고리의 평균적 도시철도 분담률을 적용하면 12.5%이 된다. 그리고 승용차, 버스, 택시는 기존 분담률의 비율에 따라 도시철도로 수단전환하고 남은 분담률은 각각 45.7%, 34.4%, 7.4%가 된다. 여기서 접근거리/직선거리 비율은 1.0보다 작으므로 기존 수단분담률이 아닌 해당 카테고리의 평균적 교통수단 분담률을 적용하게 된다.

승용차, 버스, 택시 분담률은 도시철도 분담률을 제외한 비율에서 기존 분담률의 비율별로 산출한다. 예를 들어 승용차 분담률은 다음과 같이 산출된다.

$$\text{승용차 분담률(\%)} = (100.0 - 12.5) \times \frac{52.2}{(52.2 + 39.3 + 8.4)} = 45.7$$

〈Table 4〉 Mode Share after Step 1

Mode	Market Share of Mode in the Base Year (%)	Market Share of Mode After Step 1 (%)
Automobile	52.2	45.7
Bus	39.3	34.4
Taxi	8.4	7.4
Urban Rail	0.0	12.5

〈Table 4〉는 단계1에 의해 추정된 초기 교통수단 분담률이다.

2) 단계2: 카테고리별 도시철도 노선의 O/D쌍 입지적 특성을 반영한 교통수단 분담률 보정

관측 자료인 가구통행실태조사를 기반으로 전수화하여 구축된 기준연도 O/D자료는 전수화 O/D 검증과정을 거친 것이므로 신뢰성 있는 자료로써 인정하고 분석하는 것이 일반적이다. 이처럼 관측 자료에 기반을 둔 자료는 분석대상 도시의 지역적 특성이 반영되고, 기존 노선을 이용하는 수요가 안정화된 상태의 도시철도 이용수요로 볼 수 있다. 따라서 기준연도의 카테고리별 평균적 도시철도 분담률을 점진적 로짓모형의 기초 수단분담률로 적용할 수 있다. 그러나 단계1의 초기 수단분담률을 보정 없이 도시철도 신설 후인 예측연도의 각 카테고리에 해당하는 O/D쌍에 그대로 적용하는 데는 몇 가지 문제점이 존재한다.

첫째, 신설 도시철도의 속도 향상과 같이 기능향상에 의해 서비스수준의 변화가 존재할 수 있으므로 카테고리별 기준 분담률 산출 시의 도시철도 서비스 수준과 차이가 있을 수가 있다. 따라서 기준연도와 예측연도 사이의 철도 서비스 수준 차이를 반영한 도시철도 분담률 보정작업이 필요하다.

둘째, 관측 자료에 의한 카테고리별 분담률 산출 시 도시철도 노선 선형과 도시철도 신설 후 특정 O/D쌍을 연결하는 도시철도 노선 선형과의 차이로 서비스 수준에 차이가 존재할 수 있다. 〈Figure 7〉은 관측 자료에서 산출된 카테고리별 기준 수단분담률을 그대로 적용할 때 발생할 수 있는 문제를 예시한 것이다. 즉 카테고리별 관측 분담률 산출시 적용된 기존노선의 선형과 신설 도시철도가 도입된 후의 특정 카테고리 O/D쌍 노선 선형에 차이가 존재한다. 따라서 같은 카테고리 범주에 있더라도 도시철도의 통행시간에 차이가 있어 도시철도 분담률에도 차이가 존재할 것으로 예상된다. 따라서 이와 같은

〈Figure 7〉 Example of Difference in Line Curvature between Referred and Planned

차이를 보정하는 분석이 필요하다.

이와 같이 단계1의 초기 수단분담률을 그대로 적용하는 것은 문제점이 존재하므로 수단분담률의 보정이 필요하다. 즉 O/D쌍별로 기존 도시철도 노선과 비교할 때 새로운 도시철도에 의해 제공되는 서비스수준 및 노선 선형 차이로 인한 통행시간 차이 값을 계산한다. 다음으로 식(6)과 같은 점진적 로짓모형에 적용하여 각 O/D쌍별로 교통수단 분담률을 입지적 특성에 맞게 보정한다. 식(6)은 단계1의 수단분담률을 반영한 예측연도 O/D를 이용하여 통행배정 된 통행시간과 기준연도 통행시간의 차이를 점진적 로짓모형을 이용하여 반영하는 식이다. 여기서, β_t 는 에타지침서의 광역권 수단분담모형의 통행시간 계수 값을 의미한다.

$$P_{\text{도시철도}}^{\text{보정}} = \frac{P_{\text{도시철도}}^{\text{관측}} \exp(\beta_t \Delta T_{ij}^{\text{도시철도}})}{\sum_{n \neq \text{도시철도}}^N P_n^{\text{관측}} + P_{\text{도시철도}}^{\text{관측}} \exp(\beta_t \Delta T_{ij}^{\text{도시철도}})}$$

$$P_m^{\text{보정}} = \frac{P_m^{\text{관측}}}{\sum_{n \neq \text{도시철도}}^N P_n^{\text{관측}} + P_{\text{도시철도}}^{\text{관측}} \exp(\beta_t \Delta T_{ij}^{\text{도시철도}})} \quad (6)$$

여기서,

$P_m^{\text{관측}}$: 기준연도의 특정 카테고리에 해당하는 O/D 쌍 ij에서 교통수단 m의 분담률

$P_m^{\text{보정}}$: 도시철도 신설 후 특정 카테고리에 해당하는 O/D쌍 ij에서 교통수단 m의 보정된 분담률

$\Delta T_{ij}^{\text{도시철도}}$: 특정 카테고리에 해당하는 O/D쌍 ij에 대한 도시철도의 기준연도와 예측연도 통행시간의 차이 ($\Delta T_{ij}^m = T_{ijlm}^{\text{예측연도}} - T_{ijlm}^{\text{기준연도}}$)

β_t : 로짓모형 효용함수의 통행시간 계수 값

도시철도의 보정된 분담률 산정을 위해 단계1의 분석 결과인 〈Table 4〉를 이용한다. 다음으로 기존 체계와

〈Table 5〉 Mode Share after Step 2

Mode	Mode Market Share After Step 1(%)	Mode Market Share After Step 2(%)
Automobile	45.7	44.8
Bus	34.4	33.7
Taxi	7.4	7.3
Urban Rail	12.5	14.2

신설 체계 간의 통행시간 차이가 3분 더 빨라지고, 통행시간 파라미터는 -0.05로 가정할 때, 도시철도의 보정된 분담률은 식(6)에 의해 다음과 같이 산출된다.

$$P_{\text{도시철도}}^{\text{조정}} = \frac{0.125 \times e^{(-0.05 \times (-3.0))}}{0.457 + 0.344 + 0.074 + (0.125 \times e^{(-0.05 \times (-3.0))})}$$

$$= 14.2\%$$

〈Table 5〉는 단계2에 의해 보정된 초기 교통수단 분담률이다.

3) 단계3: 예측연도 도시철도 건설 후 서비스 변화를 반영한 교통수단 분담률 예측

예측연도의 도로의 신설/확장으로 인한 도로의 교통 서비스 수준변화와 도시철도망의 선로용량 개량화, 기존 선의 복선화 등으로 인한 도시철도 서비스의 변화를 반영하여 모든 교통수단의 상대적 서비스 변화에 따른 교통수단 분담률을 예측한다. 단계3의 수행 절차는 다음과 같다.

첫째, 도시철도의 신설은 승용차, 택시 및 버스 통행이 일부 도시철도 통행으로 전환될 것이며, 이와 같은 도로 이용 교통수단의 통행감소는 도로에서의 통행시간에 변화를 주게 된다. 이와 같은 도로에서의 통행시간 변화를 반영하기 위해 단계2에서 보정된 O/D 교통량을 적용하여 도시철도 사업시행시의 도로 통행배정(highway traffic assignment)을 수행하게 된다. 다음으로 통행배정 결과를 이용하여 도시철도 신설로 인한 도로교통 통행시간 반영 전과 반영 후의 통행시간의 차이를 산출한다.

둘째, 단계2는 도시철도 신설에 의한 도로교통 통행시간 변화를 반영하지 못한다. 따라서 단계3에서 도로 이용수단의 통행시간 변화에 의한 도시철도 사업 시행시의 교통수단별 분담률을 식(7)과 같은 점진적 로짓모형을 적용하여 추정한다. 여기서, β_k 는 에타지침서의 광역권 수단분담모형의 통행시간, 통행비용 계수 값을 적용한 것이다.

〈Figure 8〉 Calculating Procedure of Step 3

$$P_m^{\text{단계3}} = \frac{P_m^{\text{단계2}} \exp(\beta_k \Delta T_{ij}^m)}{P_{\text{도시철도}}^{\text{단계2}} + \sum_{n \neq \text{도시철도}} P_n^{\text{단계2}} \exp(\beta_k \Delta T_{ij}^n)}$$

$$P_{\text{도시철도}}^{\text{단계3}} = \frac{P_{\text{도시철도}}^{\text{단계2}}}{P_{\text{도시철도}}^{\text{단계2}} + \sum_{n \neq \text{도시철도}} P_n^{\text{단계2}} \exp(\beta_k \Delta T_{ij}^n)} \quad (7)$$

여기서,

- $P_m^{\text{단계3}}$: 도로 통행시간 변화를 반영한 교통수단 m (m=승용차, 택시, 버스) 분담률
 $P_m^{\text{단계2}}$: 단계 2에서 추정된 교통수단 m 분담률
 $\Delta T_{ij}^{\text{승용차}}$: 도시철도 신설로 인한 승용차 통행시간의 변화
 β_k : 로짓모형 효용함수 내의 계수 값

셋째, 위와 같은 과정을 O/D의 수단분담률이 안정화 될 때까지 반복 수행한다. 즉, 사업 시행으로 달라진 도로 이용수단의 통행시간을 점진적 로짓모형에 다시 적용하여 수단별 O/D를 재산출하는 과정을 통해 균형상태 (equilibrium)의 최종 수단별 O/D를 산출한다. 〈Figure 8〉은 단계3의 수행과정을 도식화한 것이다.

앞서 설명된 분석방법론을 이용하여 〈Figure 9〉와 같은 광주광역시권의 가상의 도시철도 노선을 구성하여 2021년 수단분담률 예측을 사례적으로 분석하였다. 가상의 신규도시철도는 15.7km이며, 표정속도와 배차간격은 기존 1호선과 동일하게 입력하였다.

광주광역시권의 가상의 도시철도 노선신설로 인한 2021년의 교통수단 분담률은 〈Table 6〉과 같다. 분석

〈Figure 9〉 Planned Line for Example Case of the Study

〈Table 6〉 Mode Share after Step 2, 3 in Case Study

Mode	After Step 2		After Step 3	
	No. of Trips (person)	Mode Shares (%)	No. of Trips (person)	Mode Shares (%)
Auto mobile	1,031,136	52.1	1,074,188	54.2
Bus	497,535	25.1	517,327	26.1
Taxi	274,555	13.9	281,140	14.2
Urban Rail	177,399	8.9	107,970	5.5
Total	1,980,625	100.0	1,980,625	100.0

결과는 단계2에서 산출된 수단분담률을 사업시행에 따른 초기 수단분담률로 입력하고, 수단분담모형의 β_k 중 통행시간 계수만을 고려하여 점진적 로짓모형을 1회 반복한 결과이다.

IV. 결론 및 향후 연구과제

본 연구는 도시철도 신설에 따른 수단분담률 추정의 정확성을 향상시키기 위해 관측된 교통수단 분담률 자료와 점진적 로짓모형을 활용하여 분석하는 방법을 제안하였다. 기존 연구방법은 단일 수단분담모형으로 전반적인 수단분담률을 예측하여 각 O/D쌍 간 지역적 특성, 도시철도 수단의 접근도 등을 현실적으로 반영하기 어렵다. 그러나 제안된 분석 방법은 이용자의 행태, 교통존과 도시철도 역사 간 공간적 특성을 카테고리화하여 각 O/D쌍 간에 적용한다는 점에서 기존 분석방법과 차이가 존재한다. 제시된 분석방법론의 핵심은 다음과 같다.

첫째, 도시철도역과 통행자의 접근방법을 고려하여 존을 세분화함으로써 불합리한 도시철도역 접근패턴을 줄이고자 노력하였다. 존 세분화와 센트로이드 커넥터의

조정으로 불합리적인 통행배정 결과를 사전에 방지할 수 있었으며, 도시철도를 이용하는 이용자의 접근 행태를 현실성 있게 반영할 수 있었다.

둘째, 도시철도의 접근유형(환승 횟수), 통행거리, 접근시간 카테고리별 다른 수단선택 행태의 관측 교통수단 부담률을 예측에 반영한 방법을 제안하였다. 가구통행실태 표본조사 자료를 기반으로 한 전수화 O/D자료에서 통행거리가 멀어질수록, 환승 횟수가 작을수록, 역까지의 접근시간이 짧을수록 도시철도 부담률이 높아지는 현상이 분석을 통해 관측되었다.

셋째, 도시철도 신설에 따른 도시철도 부담률 예측 분석에서 SP 자료와 zero cell로 인한 점진적 로짓모형의 적용의 어려움, 그리고 가법적 로짓모형의 이론적 한계를 극복할 수 있도록 관측 부담률 자료와 점진적 로짓모형을 활용한 분석기법을 제안하였다는데 의미가 있다.

본 연구가 제안한 방법은 KTDB 배포 네트워크와 O/D, 기존 도시철도의 통행자 통행패턴을 주요 영향요인을 카테고리화한 기초자료가 있다면 분석이 가능하다. 또한 기존의 관측 수단부담률이 없는 경우에는 해당 도시의 규모와 사회경제지표가 유사한 도시를 이용하여 산출된 카테고리별 수단부담률을 활용할 수 있다. 제시된 도시철도 신설에 따른 교통수단별 교통수요 예측 방법론은 합리적인 이론적 배경에서 이루어졌기 때문에 비교적 높은 신뢰성을 확보할 것으로 기대한다.

본 연구에서는 세분화 존의 유입, 유출 통행량 배분에 사용되는 기준지표로써 인구밀도가 동일하다는 가정 하에서 면적 비례로 배분하였다. 향후 정부의 기초 자료가 확보된다면 획지 단위별 토지이용과 GIS 정보를 활용하여 세분화 존의 유입, 유출 통행량 추정을 정교화하는 연구가 진행될 수 있을 것으로 판단된다. 이를 통해 제시된 분석방법을 더욱 현실화하는데 도움이 될 것으로 고려된다.

알림 : 본 논문은 대한교통학회 제64회 학술발표회(2011. 2. 19)에서 발표된 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

REFERENCES

1. Bates, J., Ashley, D. and Hyman, G.(1987), "The Nested Incremental Logit Model: Theory and Application to Modal Choice", PTRC Summer Annual Meeting, Seminar C, Bath.
2. Ben-Akiva and Morikawa(1990), "Estimation of Switching Models from Revealed Preferences and Stated Intentions", Transportation Research, Part A, Vol.24, No.6, pp.485~495.
3. Jo, Hang Ung., Lee, Seung Yong., and Jeon, Gong Joon(2010), "Study on Approach to Segmentation of Station Influence Area into Zones Appropriate for Demand Estimation of Urban Railway", Proceedings of the Korean Society for Railway Conference, pp.2122~2136.
4. Joachim Scheiner(2010), "Interrelations between Travel Mode Choice and Trip Distance: Trends in Germany 1978-2002", Journal of Transport Geography, pp.75~84.
5. Jonathan Preston(1991), "Demand Forecasting for New Local Rail Stations and Services", Journal of Transport Economics and Policy, pp.183~202.
6. Juan de Dios Ortuzar, Luis G. Willumsen (2001), "Modelling Transport", John Wiley & Sons, Ltd, pp.398~400.
7. Kim, Ikki(1998), "Calibration and Application of Route Choice Behavioral Model for ATIS", The Journal of Korea Planners Association, Vol.33, No.1, pp.77~90.
8. Kim, Ikki., Han, Khun Soo., and Bang, Hyung Joon.(2006), "Suggesting a Demand Forecasting Technique Explicitly Considering Transfers in Light Rail Transit Project Analysis", Journal of Korean Society of Transportation, Vol.24, No.3, Korean Society of Transportation, pp.197~205.
9. Korea Development Institute(2008), "Study on Standard Guidelines for Pre-feasibility Study on Road and Railway Projects(fifth edition)", pp.265~277.
10. Kumar, A.(1980), "Use of Incremental Form of Logit Model in Demand Analysis", Transportation Research Record, No.775, pp.21~27.
11. Koppelman, F.(1983), "Predicting Transit Ridership in Response to Transit Service

Journal of Korean Society of Transportation Vol.30 No.1 February 2012