

# 환승 및 노선우회를 고려한 광역도시철도 경로선택모형 구축

## Route Choice Modeling in Rapid Transit Network Considering Transfer Penalty and Angular Cost

양수정\*, 우연식\*\*, 이장호\*\*†

Sujeong Yang\*, Yeonsik Woo\*\*, Jang-Ho Lee\*\*†

**Abstract** The goal of this study is establish a route choice model considering transfer penalty and angular cost in rapid transit networks. In order to take the transfer penalty into account, horizontal distance, the number of stairs, the presence of escalators, and the total scaled distance were used as independent variables. Simultaneously, we also have considered the angular cost to reflect the effect of line alignment. As a result of the analysis, factors affecting the route choice such as the total travel time, the number of transfers, and the total scaled distance of the transfer station were statistically significant. However, the angular cost did not have a significant effect on the route choice. This study allows simulating the route choice behavior in the rapid transit network, it is also expected that the suggested model may be applied to provide information on the optimal route, referring to the marginal rate of substitution among the variables mentioned above.

**Keywords** : Rapid transit network, Route choice, Transfer penalty, Angular cost

**초 록** 본 연구는 광역·도시철도 네트워크에서 환승과 노선우회를 고려한 경로선택모형을 구축하였다. 이용경로의 우회에 따른 영향을 반영하기 위해서 우회비용(angular cost)을 변수로 반영하였으며, 수도권 교통카드 이력자료를 활용하여 이항로짓모형을 구축하였다. 분석결과, 경로선택의 영향요인으로는 통행시간과 환승횟수, 환승통로의 총 환산거리 등이 나타났으며, 우회비용은 통계적 유의성이 높지 않게 나타났다. 모수추정결과로부터 통행시간대비 환승역 총 환산거리와 환승횟수에 대한 한계대체율을 분석하였는데, 실질적인 환승시간 이외에 환승 자체만으로 평균 약 8~13분 정도를 환승저항으로 인지하는 것으로 분석되었다. 이를 통해 광역도시철도 이용자의 경로선택행태를 모사할 수 있을 뿐만 아니라, 최적경로에 대한 정보제공에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

**주요어** : 광역도시철도망, 경로선택, 환승저항, 우회비용

## 1. 서론

2004년 서울시 대중교통체계 개편과 2007년 수도권 통합 환승할인 요금제가 시행됨에 따라 수도권 대중교통 이용자의 경로나 수단 선택 및 대중교통 서비스가 크게 변화하였다. 특히, 환승할인제도가 도입되면서 연계성 측면에서 환승에 대한 중요성이 대두되었다.

† 교신저자: 한국교통대학교 철도대학 철도시설공학과(transwho@ut.ac.kr)

\* 한국교통연구원 도로교통본부

\*\* 한국교통대학교 철도대학 철도시설공학과

서울시 지하철의 경우 1기 지하철 이후 지하 심층부에 건설된 2기 지하철이 개통되면서 환승 경로가 복잡해지고 평균 환승 거리가 매우 길어져 환승에 의한 통행저항은 더욱 심해졌다. 또한, 대중교통의 경로선택에는 경로의 선형이 영향을 미친다. 대중교통 이용자는 최종목적지까지의 경로 중, 우회하는 구간에 대해서는 통행저항으로 인식한다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 환승역의 속성정보를 활용하여 이용자가 체감하는 환승저항과 노선우회에 따른 영향을 반영하여 광역·도시철도에서의 경로선택모형을 구축하고자 한다.

## 2. 선행연구 고찰

양창화·손의영(2000) 연구에서는 서울시 도시철도 이용자를 대상으로 환승이 경로선택에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보았다. 이를 위해 선호의식(Stated Preference: SP) 및 현시선호(Revealed Preference: RP) 자료를 이용하여 경로선택모형을 구축하였으며, 효용함수는 차내시간, 환승시간, 환승횟수, 에스컬레이터 유무로 구성하였다[1].

우왕희(2002)는 지하철 이용객을 대상으로 설문조사와 E-mail조사를 통해 자료를 수집하여 어떤 조건들이 지하철 경로선택에 영향을 미치는지 분석하였는데, 가장 적합한 모형은 환승횟수와 차내시간, 환승시간을 조합한 모형인 것으로 분석되었다[2].

천승훈(2010)은 교통카드 자료를 활용하여 「통합대중교통망에서의 경로통행배정프로세스」를 제시하였다. 총 차내통행시간, 총 통행요금, 총 환승횟수로 효용함수가 구축된 모형이 서울시 통합대중교통망에서의 최적 경로선택모형으로 선정되었다[3].

서동정(2012)의 연구는 2010년 3월 평일, 주말 하루치 교통카드 자료를 사용하여 대중교통 통합교통망체계에서의 경로선택모형을 구축하였다. 모형 정산결과를 살펴보면 차내시간과 요금, 환승시간, 환승 횟수가 주요 통행속성으로 나타났다[4].

Lam and Xie(2002) 연구에서는 싱가포르의 현시선호 및 잠재선호자료를 이용하여 경로선택모형을 구축하였는데, 통행시간은 경로선택 시 가장 중요한 요소였고, 도보거리에 대해 부(-)의 영향을 받으며, 버스보다는 지하철을 선호하는 것으로 분석되었다[5].

Grange et al.(2012)의 연구에서는 대안경로 간에 중복성 문제를 다루기 위해 로짓 모형의 확장으로 FPM(Fixed Point Route Choice Model)을 제안하였다. 산티아고의 도시철도 네트워크에 적용하여 모형을 검증하였다. 변수로는 환승횟수와 총통행시간(차내시간+대기시간+도보시간)을 포함하였다[6].

Raveau et al.(2014)은 도시철도 네트워크에서 경로선택을 추정하기 위해 통행시간, 환승 특성, 좌석이용과 편안함, 네트워크 토폴로지를 고려하였다. 이 중 네트워크 토폴로지 변수는 실제 네트워크보다 지도상의 네트워크를 이용하여 정의하였다[7].

## 3. 환승 및 노선우회를 고려한 광역·도시철도 경로선택모형 구축

### 3.1 자료구축

본 연구는 2013년 5월 21~27일 교통카드 이력자료를 사용하였다. 광역·도시철도를

대상으로 경로선택모형을 구축하는 것이 목적이므로 자료에서 버스만 이용하거나 중간에 버스경로가 포함된 통행을 제외하였다. 이러한 교통카드 자료에는 기종점 정보와 환승역 정보가 존재하지만, 모든 환승역에 대한 정보가 있는 것이 아니고, 환승역에 대한 정보는 환승개찰구가 존재하는 서울지하철 9호선과 공항철도의 경우에만 환승역이 확인될 수 있다. 따라서 대안경로는 서울지하철 9호선 및 공항철도로 환승한 경로와 서울지하철 9호선 및 공항철도를 이용하지 않고 환승한 두 가지 경로로만 구분될 수 있다. 이에 따라 135,224 O-D쌍으로 정리가 되었고 기종점별로 경로별 선택 확률(분담율)이 계산되었다.

모형구축에 있어서 신뢰성을 높이기 위해 다음과 같이 자료를 추가적으로 필터링하였다. 첫 번째, 한 O-D쌍에서는 여러 개의 경로가 존재하지만 특정한 하나의 경로만을 대부분 선택하는 통행에 대해서는 모형구축에서 제외하였다. 두 번째, 특정한 경로의 관측수가 30개 미만인 경로에 대해서도 모형구축에서 제외하였다. 세 번째, 한 O-D쌍에 대해 3~4개의 경로가 관측된 경우가 있는데, 이는 다음과 같은 경우에 나타난다. 서울지하철 9호선 혹은 공항철도 노선과 환승할 때에 환승역은 동일하나 환승하여 연계되는 노선에 따라 다르게 관측되어 있기 때문이다. 결론적으로 모든 경로선택대안은 서울지하철 9호선 또는 공항철도를 이용하여 환승한 경우와 그렇지 않은 두 가지 경로대안으로 압축되었다.

### 3.2 환승저항 관련 세부자료 구축

서울지하철 9호선과 공항철도를 이용하지 않은 경로에 대해서는 추정 가능한 경로가 다수 존재할 수 있다. 하지만, 현재의 자료에서는 확인할 방법이 없으므로 기종점간 최소 통행시간 자료에 제일 가까운 경로로 탐색하여 노선경로를 추정하였다. 환승 저항에 대한 정보는 평면거리, 계단 수, 총 환산거리, 환승시간, 에스컬레이터 유무 등을 활용하였다. 입력 자료는 수도권 교통본부(2015)의 「수도권 여객 기·종점 통행량(O/D) 현행화 공동사업」중 수도권 환승여건 실태조사 결과 자료를 이용하였다. 조사된 자료(평면거리, 계단 수, 에스컬레이터)를 이용하여 환승역 총 환산거리를 산출하였다[8].

### 3.3 노선의 우회비용(Angular Cost) 산정

Raveau et al.(2011) 연구에서는 네트워크의 선형조건을 고려하기 위하여 경로선택 모형에 우회비용(angular cost)을 설명변수로 포함하였다[9]. 여기서 우회비용은 출발지에서 도착지까지의 경로가 얼마나 우회하고 있는 가를 수치로 나타내며, 만일 출발지에서 목적지까지 일직선으로 연결되어 있는 노선을 이용하는 경우 우회비용은 0이 된다. 따라서 출발지에서 목적지간 우회하는 경로를 이용한다면 일직선으로 연결되는 경로에 비해 우회비용은 더 큰 값을 갖게 된다

본 연구에서는 우회비용을 산출하기 위해서 각 경로의 모든 경유역에 대한 X, Y 좌표를 활용하였다. 역별 좌표를 이용하여 좌표 간 거리와 각도를 구하였으며, 구해진 거리와 각도를 이용하여 우회비용을 산출하였다.

### 3.4 모형 구축

경로속성변수로는 통행시간, 운임, 환승횟수, 환승시간이 있고, 추가적으로 환승저항을 고려하기 위한 환승역 속성변수에는 환승평면거리, 계단 수, 환승역 총 환산거리, 에스컬레이터 유무를 포함한다

우회비용을 제외한 경로선택모형의 모수추정결과, 독립변수 중에서는 통행시간, 환승역 총 환산거리, 환승횟수만이 통계적 유의성을 확보하였다. 환승역 평면거리와 계단 수는 직관에 부합하는 부호를 보였지만, t-통계량이 낮아 통계적 유의성이 없었다. 운임, 환승시간, 에스컬레이터 유무에 대한 변수는 직관에 반대되는 부호가 나타나 이를 제외하였는데, 이는 다른 변수와의 상관성 때문으로 추정된다.

우회비용을 반영한 경로선택모형의 모수추정결과, 기존에 우회비용을 고려하지 않은 모형에서 통계적 유의성을 확보한 통행시간, 환승역 총 환산거리, 환승횟수는 모두 설명력 있는 변수로 존재하였다. 하지만, 본 연구에서 제안한 우회비용의 t-통계량은 절댓값 1.10으로 유의수준 70%일 경우에 추정값이 모수를 포함한다고 할 수 있다. 이는 다소 낮은 수준으로, 우회비용은 통계적 유의성을 확보하지 못하는 것임을 보여준다. 즉, 우회비용은 경로선택에 크게 영향을 미치는 요인이라고 할 수 없는 것으로 판단된다.

**Table 1 Route choice model with/without angular cost**

Variables	Route choice model without angular cost	Route choice model without angular cost
Total Travel Time (min)	-0.08770 (-5.60)	-0.07107 (-3.32)
Total Converted Distance in Transfer Station (m)	-0.00073 (-1.74)	-0.00102 (-2.05)
Number of Transfers	-0.31424 (-1.65)	-0.38033 (-1.88)
Angular cost (1/10000)	-	-0.35986 (-1.10)
<b>요약통계량</b>		
Number of Observations	287	287
$L(0)$	-198.933	-198.933
$L(\beta)$	-173.993	-173.373
$\sigma^2$	0.1254	0.1285
$\bar{\sigma}^2$	0.1103	0.1084

#### 4. 결론 및 추후 연구

첫째, 광역·도시철도 통행자의 경로선택에 통계적으로 영향을 미치는 변수로는 통행시간과 환승횟수, 환승역 총 환산거리인 것으로 분석되었다. 둘째, 국내 수도권 광역도시철도 네트워크에서 우회비용은 크게 영향을 미치지 않음을 확인하였다. 추정된

모수의 t-통계량이 유의수준 70%에 해당하여 변수에 대한 설명력이 떨어졌다. 셋째, 우회비용을 제외한 이항로짓모형과 우회비용을 고려한 이항로짓모형의 모수추정결과를 환승자체만으로 통행자가 인지하게 되는 환승저항을 산정하였다. 우회비용을 제외한 모형에서는 물리적인 시간 이외에 환승 자체만으로 평균 약 8분 정도, 우회비용을 고려한 모형에서는 평균 약 13분 정도를 환승저항으로 인지하는 것으로 분석되었다. 본 연구에서 제시한 모형을 가지고 광역도시철도 이용자의 경로선택행태를 모사할 수 있을 뿐만 아니라, 앞서 산정한 변수간 한계대체율을 이용하여 최적경로에 대한 정보 제공에 활용할 수 있다. 본 연구의 한계점과 그에 따른 향후 연구 과제는 크게 2가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째, 대안경로의 노선정보를 최소 통행시간을 이용하여 추정하였기에 실제 이용한 노선정보라고 할 수 없다. 따라서 환승에 대해 정확한 분석을 위해서 신뢰성 있는 경로추정에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 둘째, 경로선택모형의 구축 대상을 광역도시철도만으로 한정하였다. 통합 환승체계가 구축되면서 버스와 광역도시철도간 환승이 빈번하게 이루어지고 있으며, 복합수단을 활용한 경로가 이용되고 있다. 향후 버스노선까지 통합한 네트워크에 적용하여 경로선택모형을 구축한다면, 우회비용 변수가 유의하게 나타날 수도 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- [1] C.H. Yang, E.Y. Sohn (2000) Estimation of Transfer Related Values of Seoul Subway Users Using Stated Preference and Revealed Preference Analyses, *Journal of Korean Society of Transportation*, 18(4),pp.19-30.
- [2] W.H. Woo (2003) *Stochastic Transit Route Choice Model: Case of Seoul metropolitan Area*, Myeongji University, Master Thesis.
- [3] S.H. Chun (2010) *Development of a smart card data-based stochastic transit assignment model on integrated public transportation networks*, Seoul National University, Ph.D. Thesis.
- [4] D.J. Seo (2012) *Transit mode and route choice behavior analysis in transit multimodal network by using transportation smartcard data in Seoul city*, Hanyang University, Master Thesis.
- [5] S. Lam, F. Xie (2002) Transit Path-Choice Models That Use Revealed Preference and Stated Preference Data, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1799, pp.58-65.
- [6] L. Grange, S. Raveau, F. Gonzalez (2012) A fixed point route choice model for transit networks that addresses route correlation, *Procedia-Social and Behavioral Science*, 54, pp.1197-1204.
- [7] S. Raveau, Z. Guo, J.C. Munoz, N.H. Wilson (2014) A behavioural comparison of route choice on metro networks: Time, transfers, crowding, topology and socio-demographics, *Transportation Research Part A*, 66, pp.185-195.
- [8] Metropolitan Transportation Authority (2015) *Estimation of Passenger O/D in Seoul Metropolitan Area*.
- [9] S. Raveau, J.C. Munoz, L. Grange (2011) A topological route choice model for metro, *Transportation Research Part A*, 45, pp.138-147.