

수도권 도시철도망 승객이동경로추정을 위한 교통카드기반 최적 M-유사경로 구축방안

Transportation Card Based Optimal M-Similar Paths Searching for Estimating Passengers' Route Choice in Seoul Metropolitan Railway Network

이 미 영*

* 주저자 및 교신저자 : 국토연구원 국토계획·지역연구본부 책임연구원

Mee young Lee*

* Korea Research Institute for Human Settlements

† Corresponding author : Mee young Lee, mylee@krihs.re.kr

Vol.16 No.2(2017)

April, 2017

pp.01~12

ISSN 1738-0774(Print)

ISSN 2384-1729(On-line)

<https://doi.org/10.12815/kits>

2017.16.2.01

Received 19 December 2016

Revised 6 January 2017

Accepted 17 February 2017

© 2017. The Korea Institute of
Intelligent Transport Systems. All
rights reserved.

요 약

수도권 교통카드는 대중교통인구 이동에 대한 기록을 간직하고 있는 전수화 자료로서 가치가 높다. 교통카드에 기록된 정보는 버스통행의 경우 승객의 이동에 대한 정확한 정보를 담고 있으나, 도시철도는 역사의 진출입 단말기 정보만 기록되어 환승을 포함한 경로정보를 파악하기 어렵다. 수도권 도시철도망에서 나타나는 승객의 경로선정 특성을 파악하여 이동 경로추정을 위한 방안으로 활용하는 것이 필요하다. 본 연구는 수도권 도시철도의 승객이동 경로가 갖는 특징으로 M-유사경로와 환승회수의 증가를 추가적인 비용으로 고려한다고 검토하였다. 경로탐색조건을 구축하기 위해 계단형 환승계수가 도입된 비가산성 통행비용에 대하여 M-경로탐색기법을 제안하였다. 교통카드기록을 대상으로 수도권 도시철도 역간 경로의 민감도를 거시적으로 검토하였으며, M-경로탐색기법을 확률적 통행배정모형으로 구축하여 수도권 도시철도의 링크통행량, 노선간 환승통행량의 결과를 도출하였다.

핵심어 : 교통카드, 수도권 도시철도 네트워크, M-유사경로, 일반화비용, 계단형 환승계수

ABSTRACT

The Seoul metropolitan transportation card's high value lies in its recording of total population movements of the public transit system. In case of recorded information on transit by bus, even though route information utilized by each passenger is accurate, the lack of passenger transfer information of the urban railway makes it difficult to estimate correct routes taken by each passenger. Therefore, pinpointing passenger path selection patterns arising in the metropolitan railway network and using this as part of a path movement estimation model is essential. This research seeks to determine that features of passenger movement routes in the urban railway system is comprised of M-similar routes with increasing number of transfer reflected as additional costs. In order to construct the path finding conditions, an M-similar route searching method is proposed, embedded with non additive path cost which appears through inclusion of the stepwise transportation parameter. As well, sensitivity of the M-similar route method based on transportation card records is evaluated and a stochastic trip assignment model using M-similar path finding is constructed. From these, link trip and transfer trip results between lines of the Seoul metropolitan railway are presented.

Key words : Transportation Card, Seoul Metropolitan Railway Network, M-Similar Paths, eneralized Cost, Stepwise Transportation Parameter

I. 서 론

수도권 도시철도망의 승객이동경로 추정은 수도권 통행인구의 이동진단측면에서 교통카드정보의 활용과 함께 의미가 깊다(Lee, 2015). 승객이 5번까지 버스-철도수단을 이동한 정보가 교통카드에 실시간 기록되는 과정에서 버스와 달리 도시철도에서 발생하는 정확한 이동은 파악하기 어렵기 때문이다. 버스 승하차교통카드태그는 버스내부에서 이루어지기 때문에 승객이동자료의 파악이 용이하나 도시철도는 역사개찰구의 카드태그 기록만 존재하기 때문에 탑승열차 및 환승역에 대한 정보가 부재하다. 따라서 교통카드를 이용한 승객의 이동경로는 “최소통행비용경로를 통행한다”와 같은 가정을 도입하여 단일경로를 추정하는 방안이 주로 적용되었다.

수도권 도시철도망에서 최소통행시간경로를 적용하기에는 승객이동에 있어서 다소 복잡한 상황을 고려해야 한다. 우선 출발역과 도착역 간에 복수의 경로선택대안이 존재한다는 것이다. 기종점역을 연결하는 2개 또는 3개의 경로에서 최적통행시간에 대한 정확한 판단을 내리기 곤란한 경우이다. 또한 승객은 “더 환승하기 싫음”과 같이 환승회수가 증가함에 따라 자체환승에서 발생하는 비용보다 더욱 크게 저항감을 갖는 상황도 발생한다. 수도권 도시철도망의 경로탐색문제에서 이러한 두 가지 상황을 함께 고려하는 것은 1) 복수의 유사한 경로(M-유사경로)를 가려내면서 2) 환승이 발생함에 따라 추가적인 비용으로 인식하도록 환승계수를 반영하는 문제이다.

첫 번째 문제는 M보다 큰 K개의 경로를 탐색하여 M-유사경로를 선택하는 상황으로 기존의 K경로탐색기법을 적용하여 추정이 가능하다. 이 경우는 경로탐색의 최적조건이 성립한다는 가정아래 최적경로반복을 통하여 K개의 경로를 구축할 수 있다. 반면 두 번째 환승계수의 도입은 경로비용이 비가산성화(Non Additivity)되어 최적경로탐색을 위한 최적조건이 성립하지 않게 되어 경로의 열거를 통하여 문제해결방안이 필요하다.

Shin et al.(2016)은 계단형 환승계수(Stepwise Transfer Coefficients: 이하 STC)가 도입된 대중교통망을 대상으로 경험적 최적경로탐색기법을 제안하였다. 이 과정에서 K경로탐색기법인 진입링크기반 전체경로삭제기법(Azevedo et al., 1993; Shin, 2004)을 도입하여 ‘가능경로집합조건’에 포함되는 K경로에서 최적경로를 선정하는 방안을 마련하였다. 특히 8링크-7노드-5환승-3경로로 구성된 Toy 네트워크를 대상으로 경험적으로 최적경로를 확인하는 과정을 예시하였다. Shin et al.(2016)은 대규모 대중교통망에서 STC를 포함하는 경로탐색은 교통망의 특성을 파악하여 최적경로(M=1)를 선택하기 위한 K값의 결정과 관련이 있음을 제시하였다.

본 연구는 교통카드를 이용하는 승객이 수도권 도시철도에서 이용한 통행경로를 추정하는 방법론을 검토한다. 이를 위해 수도권 도시철도망의 경로선택특성에서 나타나는 현상을 파악하고, 이를 기반으로 STC가 포함된 경로비용을 고려하여 기종점 간 M-유사경로를 추정하는 방안을 제안한다. 이 연구는 K경로로 구성된 경로가능집합을 구성하는 측면에서 Shin et al.(2016)과 동일하나 1) 실제 대중교통망에서 수도권 도시철도의 교통카드 이용승객에 대하여 적용하였으며, 2) K경로로 구성된 경로가능집합에서 M경로 선정을 위해 K상한과 M결정에 대한 실증적인 연구를 시행했다는 측면에서 차별화 된다.

연구의 진행은 다음과 같다. II장은 수도권 도시철도의 경로선택특성을 파악하고, 복수의 경로탐색기법과 STC를 반영하여 경로를 탐색하는 기존 연구를 검토한다. III장은 STC를 반영하여 M-유사경로를 탐색하는 기법을 제안한다. IV장은 수도권 도시철도망을 대상으로 실증 연구를 시행한다. V장은 연구내용을 요약한다.

II. 비가산성 비용을 고려한 K경로 구축방안

1. 수도권 도시철도망의 승객이동경로 특성(Lee and Sohn, 2016)

수도권 도시철도를 이용한 승객의 교통카드정보는 승차역 및 하차역의 개찰구 카드태그에 대한 기록이 존재하나 승객이 이용한 열차와 환승역에 대한 내용은 제공되지 않는다. 따라서 승객이 도시철도망을 통해서 이동한 경로를 추정하기 위해서는 크게 두 가지의 고려사항이 필요하다(Azevedo et al., 1993).

첫 번째는 기종점 간 유사한 통행경로가 존재하는 구간이 많아 유사한 경로를 탐색하여 승객의 행태를 반영하는 것이 필요하다. <Fig. 1>은 인천1호선과 공항철도가 만나는 계양(Gyeyang)역과 7호선과 1호선의 환승역인 온수(Onsu)역 사이에 2개의 유사경로현황을 나타내고 있다. 계양역과 온수역 사이에 위치하는 부평구청역과 부평역 두 지점에서 환승을 통해서 도착하는 역수는 동일하다. 승객의 확률적 선택특성을 감안할 때 하나의 경로를 선정하는 것은 편향될 수 있다. 계양역과 부평구청역 사이에 존재하는 굴현, 박촌, 임학, 계산, 경인교대입구, 작전, 갈산역과 온수역 사이에도 동일한 문제가 발생한다.

두 번째 검토사항은 승객이 환승회수의 증가에 대해 추가적인 비용으로 인식하는 현상이다(Lee, 2015; Azevedo et al., 1993). 대중교통수단선택에서 차의통행으로 분류되는 환승에 대해 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있다. <Fig. 2>는 화곡(Hwagok)역과 신림(Sillim)역 사이의 2개의 유사경로를 나타낸 것이다. 경로선정 사유를 외관상의 통행시간으로 평가하면 Path1은 10개역을 통과함으로 Path2의 13개역보다는 유리하나 환승회수가 Path1은 2번, Path2는 1번 발생한다. 따라서 Path1(2번 환승과 10개역)과 Path2(1번 환승과 13개역)는 유사한 경로의 특성으로 평가될 수 있다. 실제 승객의 주관적 환승영향을 반영하면 2개 경로는 유사경로로 추정된다.



<Fig. 1> Two Similar Paths Between Gyeyang and Onsu Railway Stations (Lee and Sohn, 2016)



<Fig. 2> Two Similar Paths Which Have Different Number of Transfers and Stations Between Hwagok and Sillim Railway Stations (Lee and Sohn, 2016)

위의 두 가지 특성을 반영하여 수도권 도시철도를 이용한 승객의 M-유사경로를 추정하는 본 연구의 방법은 첫 번째는 M보다 큰 K개의 경로를 나열하고 M개를 선택하는 방안이며, 두 번째는 계단형 환승계수(Stepwise Transfer Coefficients: STC)를 도입하여 환승이 발생하는 지점에서 출발지부터 누적되어 나타나는 환승회수 저항감에 대한 가중치를 적용하는 방안이다. STC를 적용하여 경로를 탐색하는 방안은 최적조건이 만족되지 않는 비가산성 경로비용(Non Additive Path Cost)로 분류된다. 따라서 수도권 도시철도의 경로이용 추정은 “비가산성 경로비용을 고려한 M-유사경로탐색문제”가 된다.

2. 비가산성 경로비용과 K-경로탐색

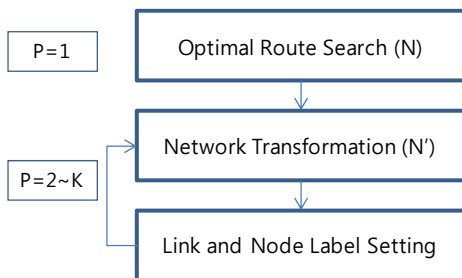
M-유사경로(이하 M-경로)는 첫 번째 경로인 최적경로비용과 차이가 특정오차 내에 있는 M개의 경로를 의미한다. 최적경로와 두 번째 경로의 비용차이가 크면 $M=1$ 이며 최적경로 및 유사경로이다. 일반적으로 도로 및 대중교통네트워크에서 경로비용의 측정이 정확하지 않기 때문에 비용이 비슷하다고 느끼는 경로를 ‘유사경로집합’으로 정의하고 확률적으로 최적경로대안으로 나열하는 방법론이 시도되고 있다(Azevedo et al., 1993; Shin, 2004; Yen, 1971; Shier, 1979; Martins, 1984).

M-경로탐색기법으로 K-경로탐색알고리즘(이하 K-경로기법)의 활용이 요구된다. K-경로기법은 비용 순차적으로 K개 경로를 탐색하는 방법이다. 이를 위해 M보다 큰 K를 설정하고($M < K$) K-경로를 탐색한 후 M-경로를 확정하는 방안이 필요하다. 이 경우 K-경로구축기법은 최적경로탐색의 반복수행으로 이루어지기 때문에 최적경로탐색에서 요구되는 표지갱신 또는 확정의 과정이 동적계획법의 최적조건에 부합하는지의 여부에 대한 확신이 요구된다(Bellman, 1957).

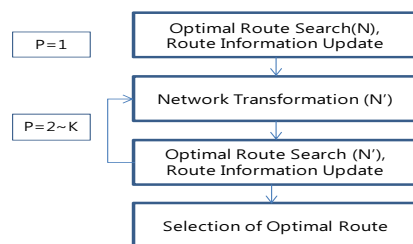
이러한 판단기준을 위한 최적조건은 경로를 구성하는 개별링크 및 회전비용의 합은 경로비용과 같다는 비용의 가산성(Additive Cost)을 근거로 하고 있다. 비가산성 비용(Non Additive Cost)(Gabriel and Bernstein, 1997)은 경로의 개별구성요소의 비용의 합이 경로비용과 일치하지 않아 최적조건에 위배되는 현상이 발생한다. 따라서 최적경로탐색의 반복으로 K-경로기법에 적용할 수 없으며 K-경로를 구축하는 새로운 방안이 요구된다. 특히 1절에서 설명한 STC는 비가산성 경로비용에 대한 반영을 필요로 하며 가능한 K-경로로 구성된 가능경로집합을 구축하고 M개의 서로 다른 경로를 선정하는 과정이 필요하다. Shin et al.(2016)은 가능경로집합의 구축방안으로서 진입링크기반 전체경로삭제기법의 변형된 방안을 제시하였다.

3. 가능경로집합의 구축: 전체경로삭제기법의 적용

K번째 경로를 탐색하는 과정에서 전체경로삭제기법은 기존에 탐색된 K-1개의 경로전체를 제외한 교통망을 구축하여 K번째 경로를 탐색하는 것이다(Azevedo et al., 1993; Shin, 2004; Martins, 1984). 전체경로삭제기법은 One-to-One 부분경로삭제기법(Yen, 1971)과 One-to-Many기법(Shier, 1979)과 비교하여 최적경로탐색을 한번 수행하고 K-1개의 경로는 K-1번의 네트워크 변형과 노드 및 링크 표지확정으로 경로를 탐색한다(Azevedo et al., 1993; Shin, 2004). 따라서 탐색속도에 있어서 기존의 기법(Yen, 1971; Shier, 1979; Martins, 1984)과 비교하여 매우 빠르게 탐색하는 장점이 존재한다. <Fig. 3>은 진입링크기반 전체경로삭제기법을 나타내고 있다(Azevedo et al., 1993).



<Fig. 3> In-Coming Link Based Entire Path Deletion Method (Azevedo et al., 1993; Shin, 2004)



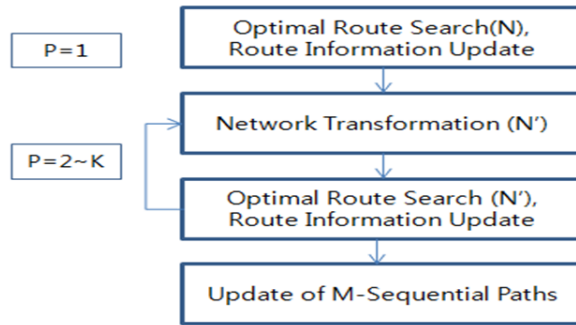
<Fig. 4> Selection of Optimal Route in Feasible Path Set Using Revised In-Coming Link Based Entire Path Deletion Method (Shin et al., 2016)

Shin et al.(2016)은 네트워크 변형기법을 적용하여 STC가 포함된 비가산성 경로비용을 고려한 ‘가능경로집합’을 구성하는데 네트워크 변형과 노드 및 링크표지를 확정하지 않고 K번의 최적경로탐색과정을 수행하여 K개 경로로 구성된 가능경로집합을 구축하고 경로비용의 재구축을 통하여 최적경로를 선정하는 방안을 제시하였다. <Fig. 4>는 K개 경로로 구성된 가능경로집합에서 최적경로를 선정하는 절차를 보여주고 있다.

Ⅲ. 수도권 도시철도 교통카드기반 경험적 최적 M-유사경로구축기법

1. 수도권 도시철도 M-유사경로 구축방안

K개 경로로 구성된 가능경로집합에서 M-유사경로를 선정하는 방안은 <Fig. 5>와 같다. 진입링크기반 전체경로탐색기법을 적용하여 K개의 경로를 탐색하는 과정은 <Fig. 4>에서 제시한 최적경로선정기법과 동일하다. <Fig. 5>는 M-유사경로를 비용순차적으로 선정하는 방안으로 대처되었다.



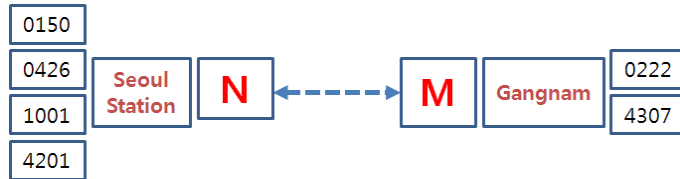
<Fig. 5> Selection of M-Similar Paths in Feasible Path Set Using Revised In-Coming Link Based Entire Path Deletion Method

2. 수도권 도시철도 네트워크 구축방안

환승은 서로 다른 노선 간의 갈아타기이다. 환승역에는 2개 이상의 도시철도노선이 교차되며 전용환승통로가 이용된다. 강남역의 사례로 파악하면 2호선과 신분당선의 환승이 발생하며 환승전용통로를 이용하여 갈아타기가 이루어진다. 환승은 노선간 환승과 자체역 환승으로 구분된다. 노선간 환승은 승객이 경로를 선택하는 과정에서 열차하차, 환승이동, 환승대기, 열차탑승으로 나타난다. 자체역 환승은 최초 교통카드를 진입태그한 노선과 탑승열차의 운영노선이 다른 경우에 발생한다. 3호선 교대역에서 진입카드를 태그하고 2호선 열차를 탑승하는 경우는 환승통로를 따라 이동하게 되므로 자체환승이 된다. 반대로 3호선 열차에서 하차하여 2호선 역사로 진출카드태그하는 경우도 자체환승으로 분류된다. 따라서 노선간 환승과 자체역 환승을 모두 구분하기 위해서는 진입 및 진출단말기의 운영노선정보를 도시철도 네트워크에 기록하는 방안이 요구된다. 교통카드단말기가 출발역 또는 도착역이 환승역이면 환승통로를 이용하는 승객은 노선간 환승과 자체역 환승 모두로 나타나기 때문에 두 환승수요를 합산하는 수행과정이 필요하다. 이를 위해서는 기존에 카드태그기록을 맵핑하는 빅노드(Big Node) 개념(Lee and Sohn, 2016)에서 카드태그지점과 초승지점을 분리하

는 작업이 요구된다.

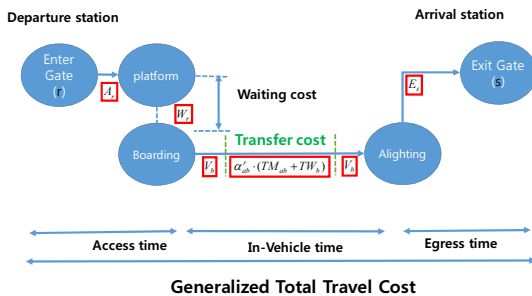
<Fig. 6>은 서울역과 강남역에 대하여 역명을 중심으로 기존의 빅노드 N, M으로 복수의 노선을 맵핑하는 상황을 보여준다. 서울역과 강남역을 노선의 구분없이 N과 M으로 대입하면 카드태그정보는 삭제되고 N과 M의 빅노드를 대상으로 경로를 탐색하게 된다(Lee and Sohn, 2016). 이 경우는 노선간 환승은 계산되지만 자체역 환승은 반영하지 못하는 한계가 존재한다. 따라서 본 연구는 노선간 환승량을 추정하는 네트워크 구축 방안을 적용한다.



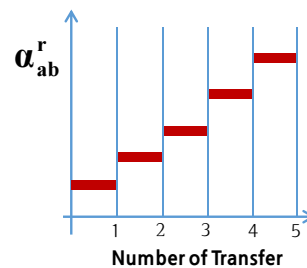
<Fig. 6> Big Node N, M between Seoul Station and Gangnam Based on Station Names (Lee et al., 2016)

3. 수도권 도시철도 경로비용

여행비용(T)에 포함되는 항목은 진입태그(r)에서 플랫폼 접근시간(A_r), 열차대기시간(W_r), 열차통행시간(V_b), 환승이동시간(TM_{ab}), 환승역 열차대기시간(TW_b), 하차후 진출게이트(s) 접근시간(E_s)으로 구성되어 있다. 특히 환승에 따른 주관적인 감정을 비용화하기 위하여 환승에 소요되는 이동 및 대기시간인 ($TM_{ab} + TW_b$)를 출발지부터 인식하도록 환승계수를 도입하는 방안을 시도하여 $\alpha_{ab}^r \cdot (TM_{ab} + TW_b)$ 로 구축하였다. 식(1)은 환승계수를 반영하여 일반화비용으로 산정된 통행비용을 나타내고 있다. <Fig. 8>에서 α_{ab}^r 는 누적환승함수의 형태로서 환승계수를 계단형(Stepwise) 형태로 나타낸 것이다.



<Fig. 7> Travel Cost Between Entry and Exit Gates (Sohn, 2015), Revision of (Sohn, 2015)



<Fig. 8> Stepwise Transfer Parameter (Shin et al., 2016)

$$T^{rs} = A_r + W_r + \sum_b V_b + \sum_a \sum_b \alpha_{ab}^r \cdot (TM_{ab} + TW_b) + E_s \tag{1}$$

여기서 a, b : 링크, ab : 회전 a - b 로 수단환승 포함
 α_{ab}^r : r에서 회전 a - b 까지 환승계수

본 연구에서 적용한 환승비용(TT^s)은 초기 열차대기시간과 환승하면서 발생하는 이동 및 대기시간을 합한 개념이다. 초승열차 대기시간을 환승비용에 포함한 이유는 플랫폼 접근시간(A_r)을 최초통행으로 가정하면 열차대기시간은 환승으로 고려된다.

$$TT^r = W_r + \sum_a \sum_b \alpha_{ab}^r \cdot (TM_{ab} + TW_b) \cdot \delta_{ab}^r \tag{2}$$

여기서 δ_{ab}^r : ab 최적경로 포함이면 1, 아니면 0

식(1)의 해를 구하기 위해서는 최적경로선택을 위한 알고리즘이 요구되며, 식(3)과 같이 링크표지에 근거한 최적경로탐색방법을 수행한다.

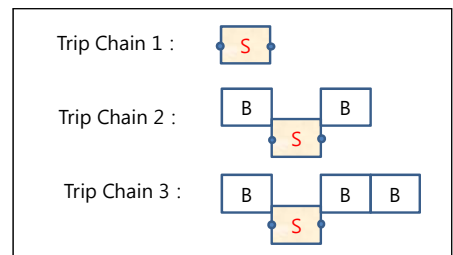
$$\pi_b^r = \min(\pi_a^r + TM_{ab} + TW_b + V_b, \pi_b^r) \tag{3}$$

π_b^r : r에서 b의 도착노드까지 최적경로비용

III. 수도권 교통카드자료를 통한 M-유사경로구축 실증연구

1. 분석방안

교통카드자료는 2014년 10월 13일(월) 자료를 대상으로 도시철도가 포함된 연계통행을 구축하여 환승의 특성을 파악한다. 도시철도의 환승은 개별철도통행에 대하여 출발역과 도착역을 연결하는 경로를 탐색한다. <Fig. 9>는 개별승객이 최초 출발역에서 도착역까지의 철도(S)단독 또는 버스(B)-철도(S)를 이용한 연계통행에서 철도통행을 추출하는 과정을 나타내고 있다. 3개의 연계통행은 각각 S, BSB, BSBB로서 3개의 S를 추출하게 된다. 개별 S에 대하여 출발역을 기점(O: Origin), 도착역을 종점(D: Destination)으로 하는 모든 S를 합산하면 기종점 통행량인 OD가 생성되게 된다. 개별 OD에 대하여 본 연구에서 제안하는 M-경로 알고리즘을 통하여 경로를 탐색하고 1/M의 확률로 M개의 경로에 통행을 배정하는 방안이다.



<Fig. 9> Separation of Three Railway Trips from Three Trip Chains

2. 분석자료

입력자료는 최종적으로 수도권 통합요금제에 진입한 용인경전철까지 포함된 네트워크로서 역간 통행시간 정보를 담은 1,162개 링크, 역사게이트ID 601개 노드, 환승은 712개로 구성된다. 이때 생성된 빅노드는 513개이다. <Table 1-3>는 링크, 노드, 환승데이터를 요약하여 나타낸 것이다.

환승역에서 노선별 차등간격은 침두시 30%, 비침두시 70%를 반영하여 적용하였다. 이렇게 반영한 이유는 전일 대중교통카드자료를 대상으로 모형을 구축하였기 때문에 교통카드에서 나타나는 통행현상을 적절하게 반영하기 위하여 평균화한 값이다. 대중교통카드자료를 이용한 수도권 철도운송기관 연락운임정산에도 이러한 논리를 적용한 사례가 있다(Shin, 2013).

<Table 4>은 본 연구에서 적용된 STC를 나타낸 것으로서 환승회수에 따른 계수값을 표현하고 있다. 이 값은 수도권 도시철도에서 환승통행을 경험하는 통행표본을 대상으로 설문조사를 시행하여 도출된 수치이며 이 수치는 수도권 연락운임정산에서 활용된 사례가 있다(Shin, 2013). 수도권 도시철도의 확장과 급행철도 및 경전철의 등장으로 STC에 대한 수치는 지속적으로 모니터링 할 필요가 있다.

진입게이트에서 접근하는 시간과 열차하차 후 진출게이트까지의 시간은 각각 3분으로 입력하였다. 일반적으로 승객의 연령, 보행시설의 효과, 개찰구에서 플랫폼까지의 거리에 따라 이 값은 역사별로 차이를 보일 것으로 판단된다. 그러나 3분은 모형과 실제통행시간의 선형관계를 설명하는 효과적 수치인 것으로 파악되어 여기서 채택하였다. 향후 관련되어 연구가 필요할 것으로 판단된다(Lee and Sohn, 2016).

<Table 1> Link Input Data

Departure	Arrival	Time(min.)
Seoul Sta.	Namyong	3
Namyong	Yongsan	2.5
Yongsan	Noryangjin	3.5
Noryangjin	Daebang	2.5

<Table 2> Node Input Data

Gate-Tag-ID	Station Name	Location Code (City, Gu, Dong)
0150	Seoul Station	1103053
0151	City Hall	1102055
0152	Jonggak	1101061
0153	Jongno 3-ga	1101061

<Table 3> Transfer Input Data

From	Transfer	To	Time(min.)
Suseo	Garak Market	Munjung	2.3
Suseo	Garak Market	Songpa	1.8

<Table 4> Stepwise Transfer Coefficients

# of Transfer	Stepwise Transfer Coefficients
1	1.0
2	1.5
3	2.7
4	4.5

3. 결과도출

2014년 10월 13일 교통카드자료는 총 15,325,487개의 연계통행(Trip Chain, Travel)을 포함하고 있으며 이중 출발역과 도착역 진입게이트-태그시간, 진출게이트-태그시간 자료가 완전한 철도통행(S)은 총 7,852,523개로 나타나 이를 대상으로 분석을 시행하였다. 이를 수요가 존재하는 OD만으로 구분하면 총 234,781 OD쌍이 나타났으며, 이를 기반으로 K의 값에 영향을 받는 M을 결정하는 민감도를 분석하였다. 여기서 M의 개수는 최적경로비용 대비 10%내에 존재하는 비용을 갖는 경로의 수를 의미한다. 예를 들면 강남-대청의 통행에서

최적경로비용은 26.98인데 10%분-비용(2.698)까지 합산하면 29.678이 되며, 두 번째 경로는 28.17로서 M-유사 경로에 포함된다. 이때 M=2가 된다. 수도권 연락운임정산의 사례에서도 10% 차이의 비용을 적용하였으며 최대 M의 개수는 3개까지 허용하였다(13). M-유사경로의 차이값은 출발역-도착역에서 나타나는 경로의 거리, 통행시간, 역, 환승역 등에 따라 차이가 나타날 수 있으나 본 연구는 K개의 경로를 탐색해서 M이 어느 정도에서 결정되는가에 대한 거시적인 판단을 시행하는 과정을 거친다.

[강남 대청]

- M[0]: 26.98(분-비용) 7(역) 1(환승) : 강남->양재->매봉->도곡->대치->학여울->대청
- M[1]: 28.17(분-비용) 9(역) 1(환승) : 강남->교대->남부터미널->양재->매봉->도곡->대치->학여울->대청

연구결과는 3가지 분석내용을 토대로 검토된다.

1) 분석결과1: (최적경로: K=1 전이율)

여기서는 K경로탐색기법을 적용해서 처음 탐색된 경로(K=1)가 사후정렬과정에서 최적경로가 아닌 것으로 판정되는 비율을 검토한다. 이 비율이 높으면 K의 수를 증가시켜 가능한 많은 경로가 포함된 가능경로집합을 구축하여 최적경로(M=1)를 탐색하는 가능성을 높이는 것이 요구되나, 궁극적으로 K값이 증가하면 컴퓨팅 시간이 급격하게 증가되는 되는 부담이 발생한다.

이를 파악하기 위해 임의로 2,429개의 한정된 OD샘플에 대하여 K를 100, 50, 30, 10에 대하여 비율을 판단하였다. K=100의 경우 출발-도착역의 경로를 100개를 탐색하여 최초로 탐색된 경로가 전이되는 경우이며 K값이 높기 때문에 가장 최적경로(M=1)를 탐색할 가능성이 높아진다. <Table 5>은 K=100의 경우와 K=10의 경우 최적경로의 차이는 1개이며 비율은 1.73-1.77% 정도로서 K=10을 적용해도 최적의 해를 구축하는 것에 무리가 없음을 나타내고 있다.

2) 분석결과2: (K = 10, 30, 50, 100)에 따른 M의 변화

K값이 클수록 M은 참값에 근접한다. 수도권 도시철도망에서 K=100이면 진입링크기반 전체경로삭제기법에 의하여 최대 100개의 상이한 경로를 갖게 된다. 따라서 M의 참값을 유도할 확률이 그만큼 높게 나타난다. 여기서는 잠정적으로 K=100의 결과를 K=10, 30, 50의 결과와 비교하여 수도권 도시철도에서 어느 정도의 유사경로오차가 발생하는가를 추정한다. 예로서 안암-홍대입구에 대한 K=10과 K=100의 비교에서 M-유사 경로 값이 달라지는 경우는 다음과 같다.

안암 홍대입구 (K=10, M=1)

M[0]: 38.65(분-비용) 12(역) 1(환승) : 안암->보문->창신->동묘앞->동대문->종로5가->종로3가->종각->시청->서울역->공덕->홍대입구

안암 홍대입구 (K=100, M=2)

M[0]: 38.65(분-비용) 12(역) 1(환승) : 안암->보문->창신->동묘앞->동대문->종로5가->종로3가->종각->시청->서울역->공덕->홍대입구

M[1]: 41.55(분-비용) 15(역) 1(환승) : 안암->보문->창신->동묘앞->신당->동대문역사문화공원->을지로4가->을지로3가->을지로입구->시청->충정로->아현->이대->신촌(지하)->홍대입구

<Table 6>에서 K=10은 총 23개, K=30은 4개, K=50은 3개의 M값이 나타나 K를 증가시키는 것이 적절한 M을 판단하는 것으로 파악되었다. 여기서 주목할 것은 K=100과 K=10을 비교하여 M의 탐색에 대한 변화가 1% 미만으로 나타남으로 K=10을 적용하여 결과를 도출해도 수도권 도시철도망을 설명하는데 무리가 없다고 판단된다.

<Table 5> Switch of (M=1) among 2,429 OD Sizes

# of K	Switch of M=1	% of Switch in OD Sizes
10	42	1.73
30	43	1.77
50	43	1.77
100	43	1.77

<Table 6> Change of M Value Compared to (K=100) among 2,429 OD Sizes

Division of # of K	# of Different M Value	% of M Values
10-100	23	0.95
30-100	4	0.16
50-100	3	0.12

3) 결과분석3 : K=10, M=3으로 한정하여 확률적 통행배정

수도권 도시철도에서는 2,234,781개의 OD쌍 전체에 대하여 K=10을 설정하고 결과를 도출하였다. 또한 이 경로의 결과를 바탕으로 M을 최대 3개로 한정하고 1/M의 확률의 확률적 대중교통 통행배정을 시행하였다. 이러한 결과를 검토하기 위하여 대곡-홍대입구의 예를 들면 다음과 같다.

대곡 홍대입구 : 18.0 (인)

M[1]: 46.11(분-비용) 8(역) 1(환승) 6.00(인) : 대곡->능곡->행신->강매->화전->수색->디지털미디어시티
->홍대입구

M[2]: 47.41(분-비용) 12(역) 0(환승) 6.00(인) : 대곡->능곡->행신->강매->화전->수색->디지털미디어시티
->가좌->신촌->서울역->공덕->홍대입구

M[3]: 47.92(분-비용) 9(역) 1(환승) 6.00(인) : 대곡->능곡->행신->강매->화전->수색->디지털미디어시티
->가좌->홍대입구

<Table 7>은 확률적 통행배정을 통해서 링크통행량을 추정하여 상위 10개의 링크-노선을 표시한 것이다. 경부선의 구로-신도림 양방향에서 300,552 통행과 288,299 통행으로 가장 많은 통행이 형성되고 있으며 나머지는 2호선 구간의 서초-교대-강남-사당 구간에서 나타나고 있다. <Table 8>는 확률적 통행배정을 통해서 환승역사의 노선간 환승통행의 상위 10개를 나타낸 것으로 서울역-구로 구간에서 노선간 환승이 많이 발생하고 있다.

<Table 7> Link Trips

Departure	Arrival	Line	# of Trips
Guro	Sindolim	Kyungbu	300,552
Sindolim	Guro	Kyungbu	288,299
Goydae	Gangnam	2	264,104
Sadang	Bangbae	2	258,696
Bangbae	Secho	2	256,242
Secho	Goydae	2	255,254
Gangnam	Goydae	2	254,410
Bangbae	Sadang	2	248,229
Goydae	Secho	2	246,637
Secho	Bangbae	2	246,496

<Table 8> Transfer Trips Between Lines

Station Name	# of Transfer Trips Between Lines
Seoul Station	554,316
Guro	390,943
Dongdaemun H. C. Park	272,247
Geumjeong	214,667
Sindolim	202,516
Cheongryangni	194,902
Express Bus Terminal	163,834
Sadang	152,847
Chungmuro	148,385
Goydae	139,688

V. 결 론

수도권 대중교통은 교통카드자료의 전수화로 인하여 통행인구의 진단에 대한 가치가 높아지고 있다. 그러나 교통카드는 수도권 도시철도의 환승기록이 누락되어 있어 이용승객의 이동경로가 파악되지 않는 문제가 존재했다. 본 연구는 수도권 도시철도의 진출입 단말기 자료를 토대로 승객의 경로를 추정하는 경로구축기법을 검토하였다. 특히 수도권 도시철도는 역간 유사경로가 존재하며, 승객의 경로선택에서 환승회수의 증가를 회피하는 성향을 반영하였다. 이를 위해 K개 경로를 탐색하는 진입링크기반 전체경로삭제기법을 적용하여 계단형 환승계수를 반영하는 M-유사경로를 탐색하는 기법을 제안하였다. 수도권 도시철도에서 K와 M의 민감도를 선별된 OD를 통해 파악하였으며, 전체 OD쌍에 대하여 1/M의 균등확률에 대한 확률적 통행배정모형을 시연하였다. 링크통행량과 노선간 환승통행량의 결과 도출을 통하여 통행량 및 환승이동량 등을 적절하게 판단하여 향후 도시철도의 승객이동현상을 파악하는 모형으로 적용하는 가능성을 보여주었다.

본 연구의 M-경로 통행배정기법으로 구축된 환승량 통행배정결과는 노선간의 환승을 의미하며 자체역에서 환승이 발생하는 경우는 고려하지 못했다. 전체 환승량 추정을 위한 새로운 도시철도망 구축기법을 적용하는 방안에 대한 검토가 요구된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 논문은 2016년 추계학술대회에 발표되었던 논문 “비가산성 환승합수를 고려한 최적 M-유사경로 구축 방안”의 제목과 내용을 수정·개편하여 작성하였습니다.

REFERENCES

- Azevedo J. A., Costa M. E. O. S., Madeira J. J. E. R. S. and Martins E. Q. V.(1993), “An Algorithm from the Ranking of Shortest Paths,” *European Journal of Operational Research*, vol. 69, pp.97-106.
- Bellman R.(1957), *Princeton University Press, Princeton, New Jersey*, “Dynamic Programming”.
- Gabriel S. and Bernstein D.(1997), “The Traffic Equilibrium Problem with Nonadditive Path Costs,” *Transportation Science*, vol. 20, no. 5, pp.337-348.
- Lee M. and Sohn J.(2016), “Estimating Transfer Trips in Seoul Metropolitan Urban Railway Network-Using Transportation Car,” *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 15, no. 6, pp.36-46.
- Lee M.(2015), *Korea Research institute of human settlements*. Analysis of Transit Passenger Movement within Seoul-Gyeonggi-Incheon Area using Transportation Card Data.
- Lee M., Sohn J. and Cho C.(2016), “Constructing Transfer Data in Seoul Metropolitan Urban Railway Using Transportation Card,” *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 15, no. 4, pp.33-43.
- Martins E. Q. V.(1984), “An Algorithm for Ranking Paths that May Contain Cycles,” *European Journal of Operational Research*, vol. 18, pp.123-130.
- Shier R. D.(1979), “On Algorithm from Finding the K Shortest Paths in A Network,” *Networks*, vol. 9, pp.195-214.
- Shin S.(2004), “Finding the First K Shortest Loopless Paths in A Transportation Network,” *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 22, no. 6, pp.121-131.
- Shin S.(2013), *The Seoul Institute*, Research for Allocation of Connected Fare and Construction of Daily Allocation System for the Seoul Metropolitan Intercity / Urban Railway Organizations.
- Shin S., Baek N. and Nam D.(2016), “A Heuristic Optimal Path Search Considering Cumulative Transfer Functions,” *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 15 pp.60-67.
- Sohn J.(2015), “Dynamic Passenger-Trip Assignment Model of Urban Railway Using Seoul-Incheon-Gyeonggi’s Transportation Card,” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, vol. 36, no. 1, pp.105-114.
- Yen J. Y.(1971), “Finding the K Shortest Loopless Paths in A Network,” *Management Science*, vol. 17, pp.711-715.