

서울 광역권 통합거리비례 요금제를 위한 적절한 모형 선택에 관한 연구



육동형
국토연구원 국토인프라 연구본부 책임연구원
dhyook@krihs.re.kr

1. 서론

서울 광역권의 대중교통시스템은 차등화된 서비스와 요금수준을 가진 다양한 대중교통 차량(버스의 경우 간선, 지선, 순환, 광역, 마을)으로 구성되어 운영되고 있다. 기본적인 요금 체계는 통합거리비례제를 기반으로 환승할인을 기본적으로 제공하고 있지만, 서비스 수준에 따라 추가요금을 더 받는 형태로 운영되고 있다. 이러한 요금 체계는 처음 어떤 교통수단을 이용했는가에 따라 그 다음 교통수단의 추가 요금이 결정되는 구조이며 거리비례제의 특성상 이용자가 최종 목적지에 도달해야 최종 요금이 결정되어 요금의 산정이 개별 이용자의 경로선택에 많은 영향을 받고 복잡하다 할 수 있다.

그러나 요금 지불 방식의 전자화로 인해 이용자의 시각에서는 교통카드를 스캔하고 얼마의 요금을 지불하는가를 확인하는 정도일 뿐이지 대중교통 이용요금을 정확히 계산하는 불편함을 느끼지는 않는다. 특히, 출·퇴근 같은 일상적이고 일정한 경로의 반복적인 통행일 경우 추가 요금이 제대로 적용되는지, 교통카드를 단말기에 스캔하면서 확인할 뿐일 것이다.

반면 모형적 측면에서는 현재 주로 쓰이는 대중교통통행배정 모형이 이 요금 체계를 적절히 반영하는지에 대해 알아볼 필요가 있으며, 이에 대한 분석을 바탕으로 통합거리비례제의 요금 수준을 정확히 반영할 수 있는 모형 선택의 방향을 제시하는 것이 이 연구의 목적이다.

본 연구는 다음과 같이 구성되어 있다. 이어질 단락에서는 요금체계의 측면에서 서울 광역권의 통합거리비례

제의 복잡성에 대해 기술한다. 기본요금 수준이 차등화된 다양한 서비스 수준의 차량이용에 대해 거리비례요금제를 바탕으로 요금 산정이 어떻게 이루어지는가에 대한 분석이 주를 이룬다. 다음단락에서는 이러한 서울 광역권의 통합거리비례제를 적절히 모형화하기 위해서는 어떠한 모형이 더 적절한지에 대해 대중교통통행배정 모형의 대표적 모형인 Frequency based Transit Assignment(FTA) model(Spiess and Florian, 1989)과 Schedule based Transit Assignment(STA) (Tong and Wong(1999); Nguyen et al. (2001); Nuzzolo et al.(2003)) model의 비교를 통해 알아본다. 마지막 결론 단락에서는 적절한 모형에 대한 결론과 맺음말로 논문을 마무리한다.

2. 본론

2.1 서울 광역권 통합거리비례제의 요금체계

서울 광역권의 통합거리비례제하의 요금결정은 운행 특성별로 기본요금이 다르게 적용되며 버스의 경우, 가장 낮은 마을버스는 750원(이하 교통카드 기준), 가장 높은 경우는 광역버스로서 1,850원을 부과하고 있다. 기본적으로 복합통행, 즉, 버스와 버스, 버스와 지하철간의 환승이 포함된 통행은 통합거리비례제를 적용하고, 버스 단독 통행의 경우, 승차 시 지불한 초기 비용만 지불하면 이용이 가능하다. 하지만, 지하철만 이용한 경우에는 기본요금 1,050원에 거리비례의 요금을 가중하여 부과한다. 거리비례제거리에 따른 요금의 가중은 10km 이내는 기본요금,

<표 1> 서울 광역권 통합거리비례제 요금 수준 (일반, 교통카드 기준, 단위: 원)

대중교통	구분	요금
버스	지·간선	1,050
	순환선	850
	광역노선	1,850
	마을버스	750
지하철	-	1,050

출처: 수도권 교통본부 (2015)

<표 2> 서울 광역권 통합거리비례제하의 환승 요금 부과 기준

구분	통합거리비례
버스-버스	10km이내는 이용 차량의 최대 기본요금, 이후 5km마다 100원 추가
버스-지하철	
버스 단독	해당 버스의 기본요금
지하철 단독	10~40km의 경우 매 5km마다 100원, 40km초과하는 경우 매 10km마다 100원

출처: 수도권 교통본부 (2015)

이후 매 5km마다 추가요금 100원을 적용한다. 하지만, 지하철 단독 이용시에는 조금 다른 거리비례제가 적용되는데, 10~40km의 총 통행거리에는 매 5km마다 100원의 추가요금이 부과되고, 40km초과하는 경우는 매 10km마다 100원의 추가요금이 적용된다.

정확한 차종별 적용 요금을 정리하면 다음 <표 1, 2>와 같다.

이러한 요금체계는 단일 요금제와 거리비례제가 공존하고 있는 형태이며, 거리비례 요금 또한 통행수단에 따라 두 가지 거리비례의 가중치를 부여하고 있다. 여기에, 차량의 서비스 수준에 따라 기본요금이 상이하므로, 더 높은 기본요금을 가지는 차량으로 환승 할 경우, 그 전 탑승 차량의 기본요금과의 차이를 더 지불해야 한다. 두 가지 요금체계가 공존(단일, 거리비례제)하고 운행 특성별로 기본요금이 상이하므로 인해 요금의 결정이 어떤 차량을 환승했는가에 따라 달라지며, 여기에 통행거리를 고려하여 거리비례 요금이 부과된다는 점에서 다소 복잡한 형태의 요금체계라 할 수 있겠다.

요금 수준이 비용의 형태로 통행수단이나 통행경로에 미치는 영향은 통행에 대한 효용의 계산에서 빠지지 않는 요소라는 것(Yook and Heaslip, 2014)을 감안한다면, 모형의 측면에서는 정확한 요금을 반영함으로써 각 O/D쌍의

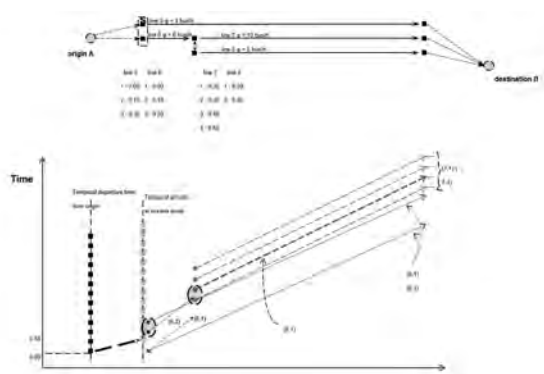
교통수요가 체감하는 요금에 의한 효용을 정확히 계산하는 것이 필수적이다. 이는 곧 통행경로의 선택과도 직결되므로 통행배정의 결과와도 연관되어 있는 만큼 상당히 중요한 이슈이지만 서울의 통합거리비례제가 적절히 모형화 되고 있는가에 대해서는 아직 활발한 논의가 없는 실정이다. 본 연구는 현재 알려진 통행배정기법의 비교를 통해 서울시의 통합거리비례제가 어떤 기법에 의해 더욱 현실적으로 모형화 될 수 있는가를 알아보려 한다. 다음 단락에서는 현재 대표적으로 알려진 두 가지 대중교통 통행배정 기법, 즉 FTA 모형과 STA 모형의 간략한 소개와 거리비례제에 대한 모형의 적합성을 알아본다.

2.2 통합거리비례제를 위한 적절한 모형의 선택

요금수준이 승객의 차량 이용거리에 따라 달라지는 거리비례제를 정확히 모형화하기 위해서는 통행배정모형에서 승객의 경로를 효율적으로 추적할 수 있어야 한다. 이 단락에서는 STA 모형이 승객의 경로선택을 그대로 모형화 하여 거리비례제 요금을 반영하기에 적절한 통행배정 모형이라는 것을 주된 논점으로 한다. STA 모형에서 승객의 경로 선택이 그대로 드러나는 것은 STA 모형이 출발지에서 도착지까지의 모든 가능한 경로가 구축되는 time expanded network를 기반으로 있기 때문인데 이에 대한 간단한 설명은 다음과 같다.

2.2.1 Time expanded network

Time expanded network에서는 출발점에서 도착점까지



출처: Yook and Heaslip (2015)

<그림 1> Time expanded network

의 가능한 모든 통행경로가 가상적으로 구축되어져 이용자의 통행경로 파악이 비교적 쉽게 이루어진다. Time expanded network에서 구축되는 네트워크의 도식적인 표현은 <그림 1> (위) 과 같다.

<그림 1>에서는 FTA(위)와 STA(아래) 모형의 개념적인 차이점을 보여주고 있는데, FTA 모형에서는 대중교통 노선을 노선만으로 모형화하는 한편, STA 모형에서는 노선의 모든 운행이 쪼개져서 각 차량의 운행이 반영되는 것을 알 수 있다. 시간간격을 두고 운행하는 차량의 출발이 시간의 흐름에 따라 다음 역을 연결하고 있으며 또한, 이러한 가상 링크와 노드가 출발지부터 목적지까지 시간의 차이를 두고 연결하고 있음을 알 수 있다. 이러한 네트워크 구조는 일반적인 도로 네트워크와 매우 흡사하며 도로 네트워크에서의 경로가 여러 링크의 순서적 연결이라면 time expanded network에서는 차량운행을 나타내는 가상 운행 링크의 순서적 연결로 나타난다. 따라서 승객의 경로를 추적하는 것은 직관적으로 가상 링크를 따라가기만 하면 된다. 예를 들면, 그림 1에서 9시에 출발한 이용자는 많은 출발 차량이 대기하고 있지만(굵은 점선 이후의 점들) 통행 시간을 최소화하기 위해 처음이나 두 번째로 도착하는 차량을 탑승할 것이다(굵은 점선으로 된 원안에 속한 링크). 이 경우에는 만약에 이용자가 첫 번째 도착 차량을 이용하면(노선 6번의 두 번째 운행) 그는 노선 7의 9시 20분차를 놓칠 것이다. 노선 5의 두 번째 버스를 타는 것이 실제로 목적지 B 까지 도달하는데 최단 시간 경로임을 알 수 있다. 이러한 time expanded network에서는 승객의 여정을 가상 노드와 링크를 따라감으로써 자연스럽게 경로의 통행거리를 쉽게 파악할 수 있게 된다. 이는 곧 이용 경로에 따른 거리비례 요금을 정확히 계산하는 것으로 이어진다.

반면에, FTA 모형에서의 거리비례 요금의 계산은 STA에서처럼 쉽고 정확하게 계산되지 못한다. 이는 거리비례제의 특성인 승객의 여정이 끝나야 최종 요금을 산정할 수 있는 구조를 노선을 기반으로 하는 FTA는 이미 노선별 요금 산정되어있기 때문에 그러한 거리비례제의 요금 산정 구조를 반영 할 수가 없게 된다. 이는 FTA 모형에서 목적지까지의 기대 비용을 최소화 하는 노선(최적노선; attractive lines)을 선택할 때 노선별 요금을 적용하기 때문이다. 다음 수식은 FTA모형의 수학적 표현이다(Nuzzolo, 2003).

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{a \in L} c_a v_a + \sum_{n \in N} w_n \\ v_a = & x_a f_a w_n, \quad a \in R_n^+, n \in N \\ \sum_{a \in R_n^+} v_a - \sum_{a \in R_n^-} v_a = & q_n, \quad n \in N \\ v_a \geq & 0, \quad a \in L \end{aligned}$$

여기서,

$$w_n = \frac{V_n}{\sum_{a \in R_n^+} f_a x_a}$$

L, N : 노선 세그먼트 및 노드의 집합

q_n : 노드 n 에서 목적지 s 까지의 대중교통 이용수요

f_a : 노선 a 가속한 세그먼트의 차량 배차 빈도

c_a : 노선 a 가속한 세그먼트를 이용하는 통행비용

V_n : 노드 n 에서 총 승객 수요

$$x_a = \begin{cases} 0 & \text{if } a \notin R \\ 1 & \text{if } a \in R \end{cases}$$

w_n : 노드 n 에서의 대기 시간

R_n^+ : 노드 n 에서 attractive line의 집합

수학적 표현식에서 알 수 있듯이 목적함수는 혼합 정수 비선형 계획법(mixed integer non-linear programming)임을 알 수 있다. 앞서 언급하였듯, 기대 통행비용을 최소화 하는 세그먼트의 선택을 통해 최적노선의 집합이 결정되고, 이 집합에 속한 노선만을 이용해야 기대 통행시간이 최소화 된다는 것이다. 그러나 이러한 구조에서는 세그먼트 별로 이용요금이 c_a 에 이미 산정 되어 있어 통행거리가 결정이 되어야 요금이 결정되는 거리비례제의 요금을 정확히 반영할 수 없게 된다.

더욱 정확한 설명을 위해 거리비례제의 여러 형태를 예를 들어 설명한다.

거리비례제는 대중교통을 이용한 만큼만 요금을 지불하는 순수 거리비례제부터 기본거리만큼 기본요금을 받고 그 이후에는 거리비례 요금을 부과하는 방법까지 다양한 형태가 존재한다. 여기에, 서울 광역권처럼 여러 운행 특성을 가진 차량별로 차별화된 기본요금이 부과될 경우

〈표 3〉 거리비례 요금제의 다양한 형태

구분	설명
순수거리비례	총 통행거리에 비례한 요금 부과
변형1	모든 차량에 동일한 기본요금 + 총 통행거리에 거리비례요금
변형2	모든 차량에 동일한 기본요금 + 기본거리 이후에 거리비례 요금
변형3	차량별 상이한 기본요금 + 총 통행거리에 거리비례요금
변형4	차량별 상이한 기본요금 + 기본거리 이후에 거리비례 요금

다음 표와 같이 약 5가지의 형태(Yook and Heaslip, 2015)를 고려할 수 있다.

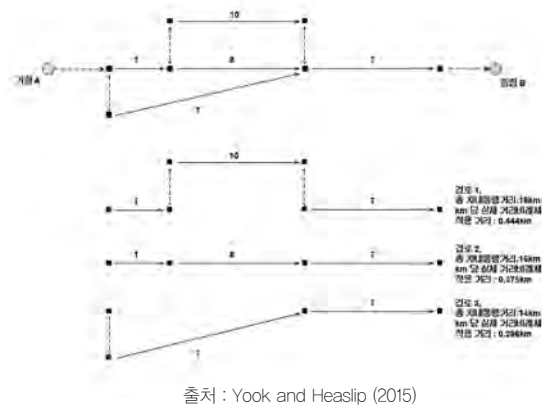
앞서 언급하였듯, 서울 광역권의 대중교통 이용요금의 산정방식은 운행 특성별로 기본요금이 다르고 10km 이후에 거리비례제가 적용되는 변형4의 구조를 가지고 있다.

여기에서는 각 요금구조별로 FTA와 STA가 변형된 구조의 거리비례요금을 어떻게 적절히 모형화 하는가에 대해 알아본다.

순수거리비례제와 변형1에 대해서는 FTA의 경우 정확한 요금 계산이 가능한데, 이는 이미 세그먼트별로 고정되어 있는 요금을 승객이 이용한 경로를 따라 모두 합산하면 거리비례의 요금과 동일한 결과를 얻기 때문이다. 하지만, 변형 2, 3, 4의 경우는 승객이 이용한 차량과 총 차내이용 거리에 따라 달라지는 요금을 반영해야 하는데, FTA의 경우에는 이미 고정된 세그먼트의 요금을 가지고 있으므로 이를 고려하여 요금을 산정하는데 무리가 있다. 변형2와 4에 대해서는 총차내통행거리에서 기본거리를 뺀 만큼에 대해서 거리비례 요금을 부과하는데 이는 곧 총 차내통행 거리에 따라 달라지므로 고정된 세그먼트별요금을 경로가 정해지지 않은 상태에서 반영하는 것은 요금제에 따른 정확한 요금을 계산해내기 어렵다.

〈그림 2〉를 보면 고정된 세그먼트별 요금이 어떤 방식으로 산정이 되고 어떻게 반영이 되는지 보여준다.

FTA 모형에서 이 요금제를 근사적으로 반영할 수 있는 한 가지 방법은 10km의 기본거리를 총 통행거리에 균등하게 배분하여 거리비례 요금을 산정하는 것이다. 예를 들면, 총 차내통행거리가 16km인 경우 10km의 기본거리를 16km로 나누어 km당 0.625km의 기본거리를 할당하는 방



출처 : Yook and Heaslip (2015)

〈그림 2〉 경로에 따른 실 거리비례적용 km

식이다. 그렇다면 실제로 km당 $0.375km = (1-0.625)$ 만 반영되어 거리비례 요금에 계산되는 것이다. FTA 모형에서는 이 값이 통행배정 전에 결정이 되어 경로마다 모두 달라질 실km가 고정되어 있으므로 정확한 요금을 산정하는데 한계가 있다는 것이다.

위 3개의 경로가 있는 노선 구성을 보면 경로마다 거리비례 요금을 위한 실km가 어떻게 달라지는가를 보여준다.

한 세그먼트는 여러 가지 경로를 구성하는데 이용되므로 하나의 고정된 거리비례제 실km는 변형 2, 4에는 적용되지 못하는 것을 알 수 있다. 실km를 0.375km로 고정한다면 2번 경로에 대해서는 정확한 요금계산이 되지만, 1과 3번경로에 대해서는 그렇지 못하다. 총 차내통행거리가 18km, 14km인 경로 1과 3은 실제로 $(18-10)/18 = 0.444km$, $(14-10)/14 = 0.286km$ 가 각각 적용되어야 한다. 0.375km가 적용된다면 경로 1의 경우는 실제요금보다 낮게, 경로 3은 실제요금보다 높게 산정될 것이다.

FTA 모형의 경직성은 이 뿐만 아니라 변형4에서 적용되는 노선별 상대적 요금을 반영하기 어려운 구조를 가지고 있다. 앞선 경우에는 각 노선별 요금을 제로로 하고 세그먼트에 km당 요금을 적용해도 거리비례 요금을 정확히 반영하기 어렵지만 단일요금제처럼 각 노선별 요금을 미리 산정하고 최적 노선을 결정하는 경우에도 변형 4와 같은 요금제를 반영하는 데는 한계가 있다. 왜냐하면 FTA 모형의 경우 STA처럼 승객의 경로를 자연스럽게 추적하면서 요금의 상대성, 즉 이전 탑승 차량에서 지불한 기본

요금에 현재 환승하는 차량이 받는 기본요금의 차이를 반영하지 못한 채 노선별 요금을 그대로 적용하기 때문이다.

하나인 요금의 정확한 분석을 위해서는 STA의 모형의 적용이 필수적임을 역설하는 바이다. ☺

3. 결론(맺음말)

지금까지 서울 광역권의 통합거리비례제에 대해 어떠한 모형이 적절한 지에 대해 알아보았다. 현재 널리 쓰이는 FTA 모형은 모형의 기본단위가 노선임으로 인해 기본요금이 다른 노선의 환승에 대한 상대적인 요금을 적절히 표현하는데 한계가 있으며, 고정된 세그먼트별 요금은 거리비례제를 산정하는데 정확성의 문제가 발생하는 것으로 파악되었다.

반면, FTA 모형은 정산이 필요한 파라미터가 없고, 차량의 운행 횟수가 잦은 도시 지역의 대중교통 시스템을 표현하는데 매우 유리하여 대부분의 교통수요예측 모형에서 널리 쓰이고 있는 것이 사실이다. 반면에, STA 모형은 FTA 모형에 비해 모형 구축의 어려움, 시간별로 구분된 기·종점 통행량이 필요하는 등 모형 및 자료의 구축이 쉽지 않음으로 인해 그 사용이 제한되어왔던 것이 사실이다(Nuzzolo, 2003). 그러나, 모형 및 자료의 구축이 크게 어렵지 않고 쉽게 처리할 수 있는 방법에 대해(Yook and Heaslip, 2015)는 소개하고 있으며 실제 적용 사례도 소개되고 있다. 또한, 본 연구에서 분석한 바와 같이, 통행의 효율을 결정하는데, 가장 중요한 두 요소(시간과 비용)중

♣ 참고문헌

- [1] 수도권 교통본부 (2015), 수도권 통합환승할인, <http://www.mta.go.kr/policy/mertotransfer.jsp>, Accessed on 2015년 5월
- [2] A. Nuzzolo, F. Russo, U. Crisalli (2001), A Doubly Dynamic Schedule-based Assignment Model for Transit Networks, *Transportation Science* 35, pp. 268-285.
- [3] A. Nuzzolo (2003), Transit path choice and assignment model approaches. In Lam, W. H. K., and M. G. H. Bell (eds.), *Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning*. Oxford, pp.93-124.
- [4] C.O. Tong and S.C. Wong (1999) A schedule-based time-dependent trip assignment model for transit networks, *Journal of Advanced Transportation*, 33, pp. 371-388.
- [5] D. Yook, and K. Heaslip (2014), "Determining appropriate fare levels under distance-based fare structure considering users' behaviors in a time-expanded network," *Transportation Research Record*, 2415, pp. 127-135.
- [6] D. Yook, and K. Heaslip (2015), "Effective Modeling for a Distance-Based Fare Structure with a Time-Expanded Network," *Journal of Public Transportation*, 18(1), pp. 1-13.
- [7] H. Spiess, M. Florian (1989), Optimal strategies: a new assignment model for transit networks. *Transportation Research Part B*, 23 (2), pp. 83-102
- [8] S. Nguyen, S. Pallottino, F. Malucelli (2001) A modeling framework for passenger assignment on a transport network with time tables *Transportation Science*, 35 (3), pp. 238-249