2019 년도 한국철도학회 춘계학술대회 논문집 KSR2019S183

광역철도 노선 직결운행에 따른 효과 예측

Estimating the Effect of Direct Connection Service in Metropolitan Railroad

박영훈*, 정진혁**

Younghun Bahk*, Jin-Hyuk Chung**

초 록 철도 네트워크가 복잡해짐에 따라 노선 간 직결운행이나 운행 계통의 통합 등 이용자의 편의성을 고려한 다양한 대안들이 제시되고 있다. 본 연구는 이러한 정책 대안들의 시행 효과를 실무자들이 쉽게 분석할 수 있는 방법론을 제공하는 것을 목적으로 하였다. 기존의 스케줄링 기법을 기초로 하여 노선 통합 분리 모형을 제시하였고, 이를 이용하여 광역철도 운행 계통의 통합과 분리 시 운영자 및 이용자의 관점에서 발생하는 변화를 반영하여 시행 후의 수요를 예측할 수 있다. 기준이 되는 시행 전 수요는 교통카드 데이터를 가지고 통행 구간별 경로 선택 확률을 구하여 알 수 있으며, SP Survey를 통하여 환승 저항을 파악할 수 있다. 본 연구의 정량적 분석 방법이 실무에서 정책 시행 효과 예측을 보다 수월하게 하고, 정책 의사 결정에도 도움이 될 것으로 기대된다.

주요어 : 운행 계통, 열차 스케줄링, 직결운행 모형, 환승 저항, 수요 모형, 카드 데이터

1. 서 론

광역철도 노선 확충으로 네트워크가 복잡해지면 이용자의 도시 광역권 내 접근성이 향상되는 동시에 환승 횟수도 증가한다. 이에 노선망이 충분히 갖추어진 대도시에서는 환승 저항으로 인한 이용 불편을 줄이기 위해 노선 간 직결운행 등 다양한 방법을 시도한다.

본 연구에서는 광역철도 노선의 운행 계통 조정에 따른 비용 변화를 운영자와 이용자의 관점에서 분석하여 최적의 운행 계통 설정 방법을 제시하고자 한다. 제시되는 모형과 분석 대상 노선의 교통카드 데이터를 이용하여 실무자들이 쉽게 최적의 운행 계통 설정이 가능하도록 하는 것을 목적으로 한다.

2. 본 론

2.1 이론적 배경

본 연구에서의 분석 방법은 Urban Transit: Operations, Planning, and Economics (Vuchic, 2005)에서 제시하는 대중교통 스케줄링 기법을 기초로 한다. 우선, Vuchic(2005)과 본 연구에서 공통적으로 사용하는 스케줄링 요소 표기법은 다음과 같다.

표 1 스케줄링 요소 표기 방식

기호	의미	단위	기호	의미	단위
$P_{\max A}$	운행 계통 A의 최대 구간 이용객 수	인/시간	C_{TU}	편성 당 최대 수용 인원	인/편성
P_{LA}	운행 계통 A의 전 구간 이용객 수	인/시간	t_t, γ	Terminal time (or coefficient)	분
P_{LT}	두 운행 계통 간 환승 이용객 수	인/시간	t_f	환승 시간	분
T_{oA}	운행 계통 A의 operating time	분	ω_f	환승 시간 가중치	-
T_A	운행 계통 A의 cycle time	분	c_o	편성 당 1시간 운영 비용	₩/편성-시간
h_A	운행 계통 A의 headway	분	c_p	1인 당 1시간 시간가치	₩/인-시간
N_{TUA}	운행 계통 A의 필요 열차 수	편성	C_o	운영자 비용	₩/시간
$\alpha_{\max}$	최대 혼잡도	인/편성	C_p	이용자 비용	₩/시간
n	편성 당 차량 수	량	C	총 비용	₩/시간

여기서 운영자 비용과 이용자 비용은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

* 한국교통연구원 철도교통연구본부
(tplanner@koti.re.kr)
** 연세대학교 도시공학과

$$C_o = \frac{(2T_o + t_t) \times P_{\max} \times c_o}{60 \times \alpha_{\max} \times C_{TU}} \quad (1)$$

$$C_p = \frac{P_L \times \alpha_{\max} \times C_{TU} \times c_p}{2 \times P_{\max}} \quad (2)$$

Vuchic(2005)에 따르면 비용 최적화는 (1)과 (2)의 합이 최소가 되는 부분이 되며, 이때의 각 변수는 최적 상태의 스케줄링 요소가 된다.

2.2 직결운행 모형

노선 내 운행 계통 조정은 크게 통합, 분리, 연장, 단축 등으로 나뉜다. 연장과 단축은 스케줄링 요소들의 값을 조정하여 분석이 가능하나 통합과 분리의 경우 이용자의 환승 변화가 발생하므로 환승 저항의 반영이 필요하다. 우선, 두 개의 운행 계통 1과 2가 계통 3으로 통합될 경우 운영자 비용과 이용자 비용의 변화는 각각 다음과 같다.

$$\Delta C_o = C_{o3} - (C_{o1} + C_{o2})$$
$$= \frac{\{T_o P_{\max 3} - (T_{o1} P_{\max 1} + T_{o2} P_{\max 2}\}(2+\gamma)}{60 \times \alpha_{\max} \times C_{TU}} \times c_o \quad (3)$$

$$\Delta C_p = C_{p3} - (C_{p1} + C_{p2}) - C_{transfer}$$
$$= \left\{ \frac{P_{L3}}{P_{\max 3}} - \left(\frac{P_{L1}}{P_{\max 1}} + \frac{P_{L2}}{P_{\max 2}} \right) \right\} \frac{C_{TU} \alpha_{\max} c_{po}}{2} - \frac{P_{LT} t_f \omega_f c_{pi}}{60} \quad (4)$$

계통 분리 시(계통 3 → 계통 1, 2)의 비용 변화는 직결운행 모형에서 부호를 반대로 바꾸어 적용한다. 이 모형은 선행 연구이자 시내버스를 대상으로 한 연구인 Bahk(2018)의 시내버스 노선 통합 모형에서 파생되었으며, 철도의 특성에 맞게 환승 통로의 이동에 의한 부분과 차량이 연결되어 운행된다는 점을 반영하면, 철도에서도 적용 가능하다.

2.3 수요 변화 모형

운행 계통 통합과 분리에 따른 환승 횟수의 증감은 통행 경로를 선택하는 대안의 효용을 변화시키므로 해당 노선을 이용하는 수요의 변화를 야기한다. 새로운 대안 선택 확률은 Incremental MNL 모형을 통하여 구할 수 있다.

Incremental MNL에서 효용 변화 요소는 환승 관련 변수들로 구성되며, 일반적으로 환승을 위해 이동하는 시간과 대기 시간을 포함한다. 이를 차내시간가치로 환산하여 최종적으로 환승으로 인한 효용 변화를 차내시간가치의 증감으로 산정할 수 있다. 차내시간가치로의 환산을 위한 보정계수는 차외시간가치/차내시간가치($\beta_{OVTT}/\beta_{IVTT}$) 또는 환승저항을 적용할 수 있다.

$$\Delta V_{in} = \beta_{walk} \Delta walk_{in} + \beta_{wait} \Delta wait_{in}$$
$$= \beta_{time} \Delta time_{in}$$
$$= (\beta_{IVTT} + \delta_{walk}) \Delta walk_{in} + (\beta_{IVTT} + \delta_{wait}) \Delta wait_{in}$$
$$= \beta_{IVTT} TP\,(TransferPenalty) \quad (5)$$

2.4 환승 저항 측정

환승 저항은 설문 조사 등을 통하여 측정할 수 있다. Stated preference survey 방식으로 다음과 같은 문항으로 환승 저항을 측정한다.

표 2 환승 저항 설문 내용

	환승 이용자	미환승 이용자
활용 목적	직결운행 시 환승 저항	분리운행 시 환승 저항
SP	열차를 갈아타지 않고 바로 가는 대신 시간이 x분 더 소요되는 열차가 있다면 이용하겠는가?	중간에 환승을 하는 대신 소요시간이 y분 단축되는 열차가 있다면 이용하겠는가?
Random Value	$x = 5, 10, 15$	$y = 5, 10, 15$
If Yes	x분에서 추가로 0분/5분/10분/15분/20분 이상이 더 걸리더라도 이용하겠다.(보기 선택)	y분보다 덜 단축되더라도 이용한다면 그 한계는 몇 분인가?(개방형)
If No	x분보다 적다면 허용 가능한 추가 시간은 몇 분인가?(개방형)	y분에서 추가로 5분/10분/15분/20분 이상이 더 단축되더라도 이용하지 않겠다.(보기 선택)

이와 같은 방식은 Contingent Valuation 방식을 다소 변형한 것으로, double-bounded 방식을 적용하지 않은 이유는 환승 저항의 경우 첫 질문 후 이어지는 두 번째 질문을 통하여 후속 질문 없이도 이용자가 충분히 지불 의사를 결정할 수 있기 때문이다. Bahk(2018)에서 버스 이용자들을 대상으로 한 조사에서 이와 같은 5분 간격의 보기를 제시하는 것이 적절하다는 결과를 얻었다.

2.5 교통카드 데이터

분석 대상 노선의 시행 전 카드 데이터를 수집하여 통행 구간별 경로 선택 확률을 구하고, 노선 통합 분리 모형과 수요 변화 모형을 가지고 시행 후의 선택 확률을 예측할 수 있다.

다른 수단 및 경로에서 유입된 수요와 유출되는 수요를 파악하기 위해서 직결되는 대상 노선뿐만 아니라 다른 노선 및 수단 이용자 변화도 함께 확인하여야 한다. 이때, 시행 전후 이용자의 경로 선택 대안을 파악하기 위하여 대상 노선의 분석 정거장과 인근 도보 가능 거리의 버스 정류장을 군집화하여 분석할 수 있다.

Bahk(2018)에서 시내버스 이용자를 대상으로 trip-chain data를 분석한 결과 모형의 타당성을 상당 수준 검증할 수 있었으며, 광역철도 직결운행의 경우도 같은 방법으로 운행 구간별 운영자 및 이용자 비용을 산정하여 정책 시행 효과를 예측할 수 있다.

2.6 직결운행 시행 효과

직결운행 시 각 구간에서 직결 지점까지의 이동에는 변화가 없으나, 직결 지점에서 환승을 하여 다른 구간으로 이동하던 이용자의 승차 및 하차가 감소하여 시설 혼잡을 줄일 수 있고, 반면 직결된 양 구간을 오가는 통행은 환승 횟수 감소로 편리성이 증대되어 이용자 수가 늘어나게 된다. 결과적으로 다른 수단으로부터 이용객이 유입되어 노면 교통 혼잡 완화에 기여할 수 있다.

표 3 직결운행 시행에 따른 구간별 통행 변화

출발 \ 도착		구간 1	직결 지점	구간 2
구간 1	효용	$\Delta V_{in}=0$	$\Delta V_{in}=0$	$\Delta V_{in}=\beta_{IVTT}TP$
	수요	현상 유지	감소	증가
직결 지점	효용	$\Delta V_{in}=0$	$\Delta V_{in}=0$	$\Delta V_{in}=0$
	수요	감소	현상 유지	감소
구간 2	효용	$\Delta V_{in}=\beta_{IVTT}TP$	$\Delta V_{in}=0$	$\Delta V_{in}=0$
	수요	증가	감소	현상 유지

반면, 계통을 분리할 경우 직결 지점에서의 환승객 증가로 유동 인구가 증가하게 되고 분리된 지역 간의 이동은 감소하게 된다. 선행 연구의 노선 분리 사례에서 실제로 직결 지점 관련 통행이 급증(최대 98% 증가)하고 분리된 지역 간 통행은 대다수가 다른 경로로 옮겨갔음(최대 78% 감소)을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

광역철도 운행 계통의 변경은 대체로 기술적인 변수가 크게 작용하나 이와 같은 물리적인 부분이 문제가 되지 않을 경우 다음 단계로서 운영 비용과 이용자들의 통행 변화를 파악하는 과정이 필요하다. 특히, 정량적인 분석으로서 수요 변화의 예측은 광역철도와 같은 대규모 운송 시스템에서는 필수적으로 수행되어야 한다.

특히, 운영자 관점에서의 비용 변화 ΔC_o와 이용자 관점에서의 비용 변화 ΔC_p를 비교하여 상호 직결운행의 유·불리를 파악할 수 있는데, 이때 어느 부분에 중점을 두어서 평가를 할 지의 문제는 분석 대상 노선의 운영 및 이용 특성에 맞게 정성적 및 정량적 평가가 종합적으로 이루어져야 한다.

제시된 일련의 방법론은 실무자가 빅데이터와 분석 모형을 어렵지 않게 적용할 수 있도록 절차를 제공하고 있으며, 이를 통해 광역철도 네트워크의 운영 효율성 증대를 위한 운행 계통 대안들이 제시될 때마다 이를 손쉽게 분석할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] M. Ben-Akiva and S. R. Lerman (1985) *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand*, The MIT Press, Cambridge.

[2] V. R. Vuchic (2005) *Urban Transit: Operations, Planning, and Economics*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.

[3] Y. Bahk (2018) Bus line integration and separation effect with interlining, M.S. Thesis, Yonsei University.

[4] K. Kim, J. Lee, and I. Yun (2017) Calculation of travel time values in Seoul Metropolitan Area considering unique travel patterns, *Journal of Korean Society of Transportation*, 35(6), pp. 481-498.

[5] G. Yoo (2015) Trnasfer penalty estimation with transit trips from smartcard data in Seoul, Korea, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(4), pp. 1108-1116.

[6] K. E. Train (2009) *Discrete Choice Methods with Simulation*, Cambridge University Press, New York.