

서울지하철 9호선 2단계 개통에 따른 급행열차 선택 및 혼잡도 변화분석

Express Train Choice and Load Factor Analysis as Line Extension in Seoul Metro 9

김경민* · 오석문 · 노학래

Kyung Min Kim · Suk Mun Oh · Hag Lae Rho

Abstract This paper investigates how to change passengers' preferences for express trains according to line extension in Seoul Metro Line 9. Before-and-after line extension, we traced passengers' path choices using Smart Card data via the method suggested by Kim *et al.* (2015). We developed two multinomial logit models before-and-after line extension. Transferability test showed that there is no difference between the two models. However, the load factor of the express train increased by 6.7% and the gap between the local and express trains became significantly wider.

Keywords : Line extension, Express train, Load factor

초 록 본 연구에서는 교통카드자료를 기반으로 한 김경민 외[1]의 승객경로추적 방법을 이용하여 서울지하철 9호선 2단계 개통에 따른 급행열차 선택에 대한 변화를 분석하였다. 분석결과 2단계 개통 전과 비교하였을 때, 1단계 구간 기존 승객들의 급행열차 선택 비율은 변하지 않음을 확인하였다. 개통 전·후로 나누어 각각에 대한 다항로짓모형을 개발하였고 개통 전·후 모형의 전이성을 확인하였다. 하지만, 급행열차에 대한 선택이 높은 장거리 승객의 증가로 인해 2단계 개통 후 급행열차의 혼잡도가 약 6.7% 상승하였고 일반열차와의 혼잡도 차이는 증가하였다.

주요어 : 연장개통, 급행열차, 혼잡도

1. 서 론

철도건설비 절감 및 대도시권의 확대에 따라 도시·광역 철도 노선에 대한 단계별 연장 개통은 이미 연장 운영중인 서울지하철 7호선 및 9호선, 추진 및 건설 중인 하남선, 별내선 및 진접선과 같이 향후 빈번하게 발생될 것으로 보인다. 따라서, 노선 연장에 따른 승객들의 통행행태 변화를 분석하고 예측하는 것은 열차운영계획 수립과 혼잡도와 같은 서비스 품질 관리를 위해 필요하다. 하지만, 서울지하철 9호선의 경우 일반열차와 급행열차가 혼합 운영되고 있으므로 노선 연장으로 인한 효과를 분석 및 예측하는 것은 쉽지 않은 일이다.

최근 김경민 외[1]은 Hong 외[2]이 제시한 도시철도 승객경로 추적 방법론을 서울지하철 9호선을 대상으로 분석한 결과 약 91% 승객에 대하여 승객들이 실제 이용한 열차를 추적할 수 있다는 것을 확인하였다. 본 연구는 김경민 외[1]의 연구와 동일한 방법을 9호선 2단계 개통 전과 개통 후 적용하여 일반열차와 급행열차에 대한 승객의 선택 및 이용행태를 분석하였다.

승객경로 추적결과 1단계 구간 기존 승객들의 승객의 급행 및 일반 열차선택 비율은 개통 전·후에 크게 변화가 없었다. 이에 대한 검증은 위하여 개통 전·후로 나누어 각각에 대한 경로선택 다항로짓모형을 개발하였고 개통 전·후 모형의 전이성을 확인하였다. 또한 출발역과 도착역에서의 급행열차 정차 유무에 따라, 승객의 환승지향이 크게 달라짐을 확인하였다.

혼잡도의 경우엔 1단계 구간에서 2단계 구간으로 이동한 장거리 승객들의 급행열차의 선택이 높아 개통 후 급행열차의 혼잡도는 6.7% 증가하였고 일반열차와의 혼잡도 차이가 2단계 개통 후 증가함을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 남은 1장에서는 도시철도 노선 연장 및 급행열차 선택에 관한 기존연구를 정리하였다. 2장에서는 분석에 사용한 교통카드 데이터 및 Hong 외[2]의 승객경로 추적 방법론을 간단하게 정리한다. 그리고 승객경로 추적을 통

*Corresponding author. Tel.: +82-31-460-5491, E-mail: kmkim@krri.re.kr.

© 2016 The Korean Society for Railway. All rights reserved.

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2016.19.5.663>

해 얻어진 개통 전·후 9호선 데이터를 정리하였다. 3장에서는 2단계 개통에 따른 통행행태 분석으로 급행-일반 열차에 대한 선택 및 혼잡도 변화를 분석하였다. 마지막으로 4장에서는 결론 및 향후 연구를 소개한다.

1.1 기존연구

국내에서는 수도권 도시철도 노선 연장에 대한 요구가 본격적으로 시작된 2010년 이후로 노선 연장에 대한 연구들이 시작되었다. 김미례 외[4]는 수도권 도시철도 노선 연장사업의 추세 및 계획을 정리하였고 노선 연장의 기대효과로 수도권 지역의 균형발전, 교통정체 문제해결 및 접근성 향상에 따른 지역경제 활성화 등을 제시하였다. 지우석 [6]은 서울시 지하철 연장의 필요성 및 효과 그리고 이러한 지하철 연장시 광역철도로의 지정 타당성을 기술하였다.

노선 연장에 대한 구체적인 연구로 신형식 외[3]는 9호선 1단계 수송실적과 2단계 기본계획에서 예측된 수송수요를 분석하여 전 구간(개화~둔촌동) 개통시 원활한 승객수송을 위한 일반·급행 열차운행시각, 차량 소요편성수 등 열차운행방안을 연구하였다. 특히, 수요의 경우 전 구간 개통시 약 65만명으로 약 30% 증가할 것으로 분석하였다. 또한, 임대성 외[5]는 7호선 온수~부평 구간 연장에 따른 월 승하차 인원 변화를 집계하였다.

국외 연구로 Mejia-Dorantes 외[7]은 마드리드 12호선의 연장이 상업시설 위치에 미치는 영향을 분석하였다. 특히, 노선연장으로 Metrosur 지역의 경제가 마드리드 중심지와와의 접근성 향상으로 인해 활성화되는 것을 확인하였다. Calvo 외[8]은 마드리드 1호선과 10호선에 대하여 노선 연장시 신규로 건설되는 역으로 부터의 거리에 비례해서 인구유입효과가 줄어드는 것을 확인하였다.

일반 및 급행열차 선택에 관한 연구로 Asakura 외[17]은 교통카드 데이터로부터 시각표 변경에 따라 승객들의 일반·급행 열차선택의 변화를 분석하였고 승객들의 선호가 열차의 운행 속도가 빠르거나 혼잡도가 낮은 열차들에서 높아지는 것을 확인하였다. Hideshima 외[10]은 현시선호 설문조사를 바탕으로 Chubu 공항철도 이용 시 열차시각표에 대한 정보가 많은 출퇴근통행자와 정보가 적은 여행자의 급행 및 일반 열차 비효용(distutility) 차이를 줄이는 연구를 진행하였다. Baek과 Sohn [18]은 서울 지하철 9호선을 대상으로 현시선호 설문조사를 통한 다항로짓모형 기반의 경로선택 모형을 개발하였다. 그리고 이동경로를 미리 계획한 승객과 다른 호선으로 환승하는 승객에서 급행열차의 선택이 높게 나타나는 것을 발견하였다. Kim 외[19]는 경인선을 대상으로 일반 및 급행열차 선택에 대한 이항로짓모형 개발 시 Box-Cox 변환을 적용하여 모형의 예측력을 향상시킨 연구 결과를 발표하였다.

2. 분석데이터 및 승객경로 추적

2.1 2단계 개통 전·후 통행량 및 서비스 변화

서울지하철 9호선은 그림 1과 같이 2009년 7월 1단계 구간(개화~신논현, 25개역, 약 27.2km)에 대한 운영을 시작하였고 2015년 3월 28일 2단계 구간(신논현~중합운동장, 5개역, 약 4.7km)이 연장 개통되었다.

표 1은 교통카드데이터로부터 얻은 연장 개통 전·후 일간 승객의 승하차 자료이다. 개통 전 데이터는 2015년 2월 9일(월), 약 40만 통행이고 개통 후 데이터는 2015년 5월 11일(월), 약 46만 통행이다. 개통 후 통행을 1구간 내에서만 이동한 통행(A), 1구간에서 2구간 혹은 2구간에서 1구간으로 이동한 통행(B) 그리고 2구간 내에서만 이동한 통행(C)으로 나누어 보면 그 비율이 81.8%, 16.4%, 1.8%로 집계되었다. 또한, 출발역(O)-도착역(L)을 급행열차 정차여부에 따라서 출발역과 도착역에 일반열차만 정차하는 경우(Type 1), 출발역에는 일반열차만 도착역에서는 급행/일반 모두 정차하는 경우(Type 2), 반대로 출발역은 급행/일

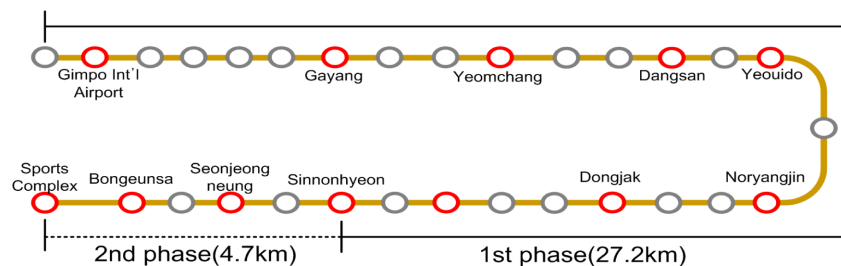


Fig. 1. Line extension of Seoul Metro Line 9.

Table 1. Trip data summary before-and-after line extension.

OD type	Origin/ Destination train stop	Before extension	After extension				Change (D-A')
		Intra-trip on Phase 1(A')	Intra-trip on Phase 1(A)	Phase 1 ↔Phase 2(B)	Intra-trip on Phase 2(C)	Total (D=A+B+C)	
Type 1	Only local/Only local	20,728 (5.1%)	22,087	2,882	238	25,207 (5.4%)	4,479
Type 2	Only local/Both stop	97,113 (24.0%)	91,961	13,680	2,829	108,470 (23.3%)	11,357
Type 3	Both stop/Only local	89,593 (22.1%)	84,993	12,848	2,498	100,339 (21.5%)	10,746
Type 4	Both stop/Both stop	198,004 (48.8%)	181,774	46,915	3,056	231,745 (49.8%)	33,741
Total		405,438 (100%)	380,815 (81.8%)	76,325 (16.4%)	8,621 (1.8%)	465,761 (100%)	60,323 (14.9% ↑)

Table 2. Number of trains before and after line extension.

Direction	Train type	Before extension(A)	After extension(B)	Change(B-A)
Up-ward	Local	124	125	1
	Express	115	118	3
Dn-ward	Local	124	125	1
	Express	115	117	2

반 모두 정차 도착역은 일반열차만 정차하는 경우(Type 3) 마지막으로 출발역과 도착역에 급행/일반 열차가 모두 정차하는 경우(Type 4)로 나누었다. 이렇게 O-D 종류를 나누는 이유는 김경민 등[1]의 연구와 같이 급행열차의 정차 여부에 따라서 승객이 선택 가능한 열차 조합이 바뀌기 때문이다. 9호선의 경우 개통 전·후의 O-D 종류별 승객의 비율은 Type 1은 개통 전 5.1%에서 5.4%, Type 2는 24.0%에서 23.3%, Type 3은 22.1%에서 21.5%, Type 4는 48.8%에서 49.8%로 크게 변동되지 않았다. 다만, 개통 후 1구간과 2구간 사이를 이동한 승객 76,325명 중 Type 4의 승객이 46,915명으로 약 61.5%로 높게 나타났다.

2단계 연장 개통 전·후의 열차 수는 표 2와 같이 일반열차는 개통 후 상하선 모두 1대씩 증가하였으며 급행열차는 상선은 3대, 하선은 2대 증가하였다. 이는 2단계 개통으로 인한 수요증가가 예상되는 상황에서 운영사가 첨두 시간에 열차를 추가 투입하여 서비스 품질 저하를 막기 위해 노력의 결과이다. 따라서 2단계 개통 후 9호선은 수요 및 공급이 모두 증가한 상황이다.

2.2 도시철도 승객경로 추적 방법론

Hong 외[2]이 제시한 승객경로 추적 방법은 정상적인 승객의 경우 플랫폼에서 게이트까지 자신이 낼 수 있는 최고 속도로 이동하는 특징에 기반 한다. 김경민 외[1]은 이러한 특성이 9호선에서도 동일하게 나타나 그림 2처럼 가양역을 2015년 5월 11일 7시 50분과 8시 10분 사이에 입장(Tag-in)하여 여의도역까지 이동한 승객들의 퇴장시간(Tag-out time)을 1차원 그래프 상에 나타내면 퇴장시간이 6개의 군집(Cluster)을 이루면서 나타나는 것을 확인하였다.

그림 3은 가로축에 승객의 입장시간, 세로축에 퇴장시간을 나타낸 입장-퇴장맵(Tag-in/out map)이다. 2차원 입장-퇴장맵에서 그림 2의 각 군집(cluster)는 퇴장시간 범위와 입장시간 범위로 확장된다. 즉, 점선으로 표시된 하나의 사각형 형태로 변환된다. 그리고 하나의 사각형은 하나의 열차(×표시, 가양역 출발시간, 여의도역 도착시간)에 매칭 되는 것도 확인하였다.

승객 경로추적은 첫 번째로 각 출발역(O)-도착역(L) 사이에 이용 가능한 경로를 생성한다. 예를 들어, 가양역-여의도역은 일반/급행이 모두 정차하므로 합리적인 승객이라면 일반열차만 이용하는 경로 1, 일반열차를 타고 염창역에서 급행열차로 환승하는 경로 2, 마찬가지로 일반열차를 타고 당산역에서 급행열차로 환승하는 경로 3, 마지막으로 급행열차만 이용하는 경로 4 이렇게 총 4가지 종류의 경로 생성이 가능하다.

두 번째로 각 승객의 승하차카드 실적과 열차운행정보를 비교하여 이용한 열차가 확실한 승객들로 부터 동일 승/하차 승객 집합을 생성한다. 여기서 이용한 열차가 확실한 승객들이란 모든 경로에 대해서 출발역 O에서 입장시간 이후에 출발하는 열차들의 집합과 도착역 L에서 퇴장시간 이전에 도착한 열차들의 집합을 생성하고 두 집합 간 교집합을 구하였을 때, 하나의 열차

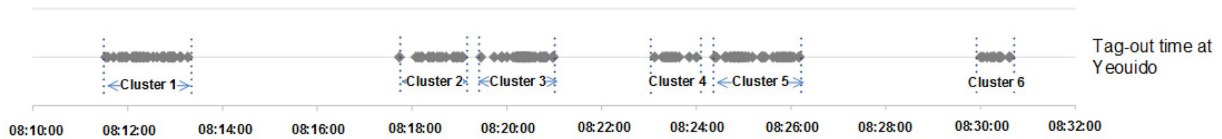


Fig. 2. Tag-out times for Gayang-Yeouido passengers [1].

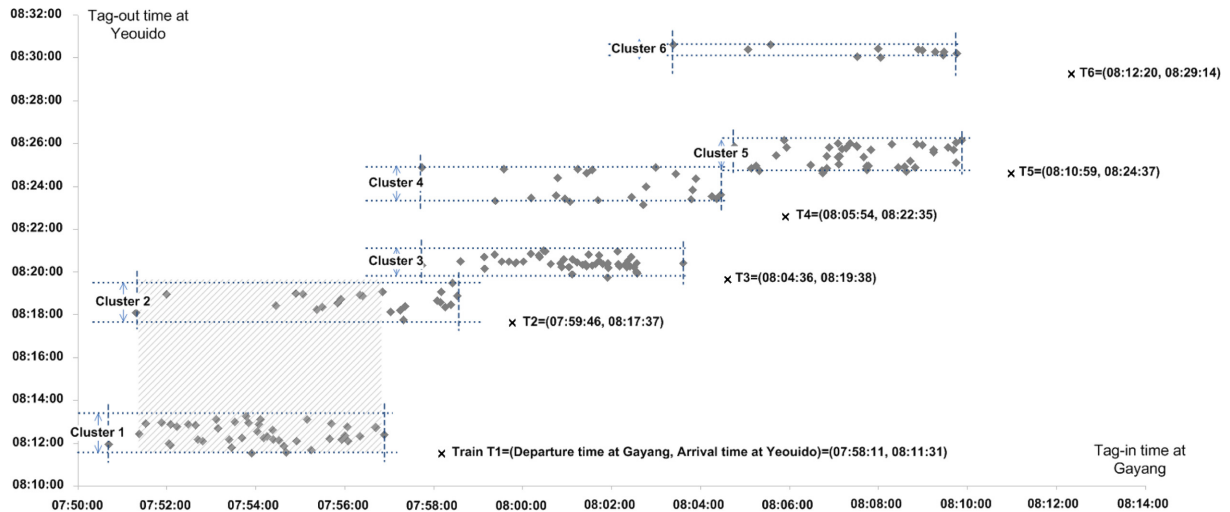


Fig. 3. Tag-in/-out map for Gayang-Yeouido passengers [1].

만 나타나는 승객이다. 동일 승/하차 승객 집합은 이용한 열차가 확실한 승객들을 역과 열차 별로 모은 것이다.

마지막으로 동일 승/하차 승객 집합 내 승객의 입장/퇴장시각을 이용하여 각 열차의 각 역별 입장시각/퇴장시각(tag-in/out time)의 범위를 구한다. 그리고 입장시각/퇴장시각(tag-in/out time)의 범위를 이용하여 각 승객의 승차열차와 하차열차 그리고 환승역을 추적한다. 자세한 방법론은 김경민 외[1]에 기술되어있다.

2.3 2단계 개통 전 · 후 승객경로 추적결과

2단계 개통 전·후 승객들의 경로 추적 결과를 일반열차만 이용한 승객(탑승열차와 하차열차 모두 일반열차), 탑승열차는 일반 열차지만 급행열차로 환승하여 하차한 승객, 반대로 급행열차를 탑승해서 일반열차로 환승한 승객, 마지막으로 급행열차를 이용한 승객(탑승열차와 하차열차 모두 급행열차)으로 구분하여 표 3에 정리하였다.

먼저 승객의 경로추적 성공률은 교통카드 데이터(표1) 대하여 개통 전의 경우 89%(360,101/405,438), 개통 후는 88%(411,032

Table 3. Summary of the results of tracing passengers.

Boarding train	Alighting train	Before extension	After extension			
		Phase 1	Phase 1	Phase 1 ↔Phase 2	Phase 2	Total
Local	Local	182,854 (50.8%)	169,451 (50.7%)	17,032 (24.9%)	6,740 (79.2%)	193,223 (5.7% ↑)
Local	Express	18,471 (5.1%)	19,045 (5.7%)	6,239 (9.1%)	0	25,284 (36.9% ↑)
Express	Local	15,874 (4.4%)	14,576 (4.4%)	6,135 (9.0%)	0	20,711 (30.5% ↑)
Express	Express	142,902 (39.7%)	131,182 (39.2%)	38,861 (56.9%)	1,771 (20.8%)	171,814 (20.2% ↑)
Total tracing passengers		360,101	334,254	68,267	8,511	411,032

/465,76)로 개통 전·후가 크게 차이나지 않았다. 추적에 실패한 승객들은 크게 두 가지 경우로 통행시간이 길어 탑승 가능한 열차가 복수개로 나오는 승객들과 입장/퇴장시간이 입장시간/퇴장시간(tag-in/out time)의 범위에 매칭 되는 열차가 없는 승객들이다.

개통 전 일반열차만 이용한 승객은 182,854명에서 개통 후 193,223명으로 약 5.7% 증가한 반면, 급행열차만 이용한 승객은 142,902명에서 171,814명으로 약 20.2% 증가하였다. 또한, 일반-급행간 환승한 승객들도 30%이상 증가하였다. 따라서, 개통 후 급행수요를 중심으로 수요가 증가됨을 확인할 수 있다. 하지만, 열차의 선택비율을 보면 1단계 내부 승객의 경우 개통 전·후 승차 열차의 급행 및 일반 선택비율이 일반-일반은 50.8%에서 50.7%로, 일반-급행은 5.1%에서 5.7%로 급행-급행은 39.7%에서 39.2%로 비슷하고 급행-일반은 4.4%로 같다. 하지만, 1단계↔2단계 구간을 이동하는 승객의 경우에는 약 56.9%의 승객이 급행열차만 이용하였다. 이는 1단계↔2단계 구간을 이동하는 승객은 장거리 이동 승객들로 급행열차의 선택이 높기 때문이다.

3. 2단계 개통에 따른 통행행태 변화분석

3.1 급행열차 선택 변화

이번 절에서는 개통 전과 후 승객들의 급행열차 선호가 변화하였는지 살펴본다. 이를 위하여 개통 전과 후 각각에 대하여 승객의 경로선택에 대한 다항로짓모형을 개발하고 개발된 모형 간 전이성이 있는지 확인한다.

일반-급행 경로선택 모형의 설명변수로 기존 연구[10]에서는 차내시간, 환승시간, 대기시간, 혼잡을 사용하였다. 하지만, 대기시간을 탑승한 열차의 출발시간에서 교통카드의 진입시간과의 차이로 추정해 사용할 경우 통계적으로 유의하지 않아 본 연구에서는 제거하였다. 혼잡에 대한 변수는 승객경로 추적 성공율이 약 88%이고 9호선의 경우 급행열차의 혼잡이 높더라도 승객의 선호가 높으므로 혼잡이 경로선택에 주요한 요소가 아니라고 판단되어 포함시키지 않았다. 따라서 교통카드자료와 열차의 출발도착시간을 가지고 정확히 알 수 있는 차내이동시간(IVT)와 환승시간(TT) 두 가지를 다항로짓모형의 설명변수로 하였다. 열차 T 가 역 S 에 도착한 시간을 $a_{T,S}$, 출발한 시간을 $d_{T,S}$ 라고 하면 차내시간과 환승시간은 아래와 같고 식(1)은 승객 i 가 경로 P 를 이용했을 때의 비용(비효용)이다.

- 차내이동시간(IVT): 환승이 없이 열차 T 를 이용한 경우; $a_{T,D}-d_{T,O}$, 역 K 에서 열차 T_1 에서 T_2 로 환승한 경우;
 $a_{T_1,K}-d_{T_1,O}+a_{T_2,D}-d_{T_2,K}$
- 환승시간(TT; 환승이동시간+대기시간): 역 K 에서 열차 T_1 에서 T_2 로 환승한 경우; $d_{T_2,K}-a_{T_1,K}$

$$U_{i,P} = \beta_i IVT_{i,P} + \beta_i TT_{i,P} + \varepsilon \quad (1)$$

각 승객의 선택집합(choice set)은 김경민 외[1]이 제시한 가능경로(Possible Route; PR)별로 하나의 경로를 생성한다. 예를 들어, 그림 4에서와 같이 급행 및 일반열차가 모두 정차하는 A역에서 E역으로 이동하는 승객은 입장시간 이후에 A역을 출발하는 일반열차를 이용하다가 역 C에서 급행열차로 환승하는 경로 P_1 와 급행열차와 일반열차만을 이용하는 경로 P_2 와 P_3 를 선택 가능하다. 따라서 이 승객의 선택집합은 $\{P_1, P_2, P_3\}$ 이다.

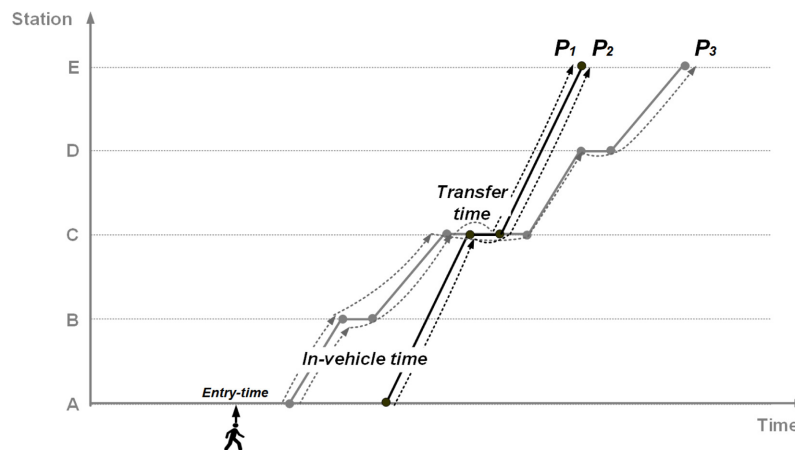


Fig. 4. Alternative paths for a passenger who travel from Station A to Station E.

개통 전·후의 급행열차 선택 차이를 분석하기 위함으므로 다항로짓모형 개발에는 1단계 구간을 이용한 승객 중 6:00:00~12:00:00 사이에 입장한 약 25만 명의 데이터를 사용하였다. 오전 승객만으로 분석한 이유는 분석에 사용한 BIOGEME 프로그램[11]의 메모리 한계 때문이다. 또한, 출발역(O)-도착역(L)을 급행열차 정차여부에 따라서 승객이 선택 가능한 열차조합이 달라지므로 일반열차만 선택가능한 Type 1은 제외하고 각 O-D 타입 별로 모형을 개발하였다.

표 4와 표 5는 개통 전과 개통 후 6개의 다항로짓모형에 대한 파라미터 추정 결과이다. 6개 모형의 모든 파라미터가 *t*-test 결과 유의수준 1%이내로 통계적으로 유의하게 추정되었다. 우도비율검정(likelihood-ratio test)결과 귀무모형과 추정된 모형이 동일하다는 가정은 기각($2 \times (LL(\beta) - LL(0)) > \chi^2_{(2, 0.01)} = 9.21$)되므로, 6가지 모형 모두 통계적으로 유의하였다.

개통 전·후 모형 간 전이성(transferability)를 분석하기 위하여 Koppelman와 Wilmot [12]이 제시한 전환지표(transfer index)를 사용하였다. 표 6의 전환지표 1은 개통 후 파라미터 $\hat{\beta}_A$ 을 개통 전 데이터에 적용하였을 때, 모형의 전이성을 나타내는 지표이다. 1에 가까울수록 개통 전 파라미터 $\hat{\beta}_B$ 을 개통 전 데이터에 적용해 계산한 우도값, $LL_B(\hat{\beta}_B)$ 과 개통 후 파라미터 $\hat{\beta}_A$ 을 개통 전 데이터에 적용한 우도값, $LL_B(\hat{\beta}_A)$ 사이의 차이가 작게 된다. 반대로 전환지표 2는 개통 전 파라미터 $\hat{\beta}_B$ 을 개통 후 데이터에 적용하였을 때, 모형의 전이성을 나타내는 지표이다. 개통 전·후 모형 간 전이성은 0.90~0.99로 매우 높게 분석되었다. 모형 간 전이성에 대한 전환지표의 적당한 임계값은 아직 기존 연구들에서도 결정되지 않았지만 일반적으로 0.85이상이면 모형 간 전이성이 있다고 판단한다(Sikder[20]). 따라서, 개통 전·후 승객의 열차선택은 크게 변화하지 않았다고 볼 수 있다.

환승시간에 대한 한계대체율(marginal rate of substitution)은 그림 5와 같다. 먼저, 개통 전·후 한계대체율의 차이는 거의 없다. 출발역에는 일반열차만 도착역에서는 급행/일반 모두 정차하는 경우(Type 2)에는 한계대체율이 1.9~2.2로 환승에 대한 시간

Table 4 Estimated parameters and their *t*-value before extension.

Origin-destination type	Type 2 (Model 1)	Type 3 (Model 2)	Type 4 (Model 3)
IVT(β)	-0.0073**(-106.20)	-0.0130**(-99.43)	-0.0047**(-196.62)
TT(β)	-0.0160**(-138.05)	-0.0202**(-100.48)	-0.0290**(-84.28)
Num. observations	57,890	38,721	147,461
$LL_B(0)$	-57953.3	-31207.1	-197021.7
$LL_B(\hat{\beta}_B)$	-24047.3	-10127.0	-73380.8
Adjust ρ^2	0.58	0.67	0.62

** : Significance level of 1%

Table 5. Estimated parameters and their *t*-value after extension.

Origin-destination type	Type 2 (Model 4)	Type 3 (Model 5)	Type 4 (Model 6)
IVT(β)	-0.0077**(-102.90)	-0.0117**(-95.03)	-0.0055**(-202.65)
TT(β)	-0.0151**(-130.14)	-0.0188**(-100.58)	-0.0309**(-87.09)
Num. observations	51,390	36,613	146,894
$LL_A(0)$	-49663.9	-30000.0	-198130.1
$LL_A(\hat{\beta}_A)$	-23995.9	-10836.1	-67022.6
Adjust ρ^2	0.51	0.63	0.66

** : Significance level of 1%

Table 6. Transferability analysis between before-and-after choice models.

Origin-destination type	Type 2	Type 3	Type 4
Transfer Index 1 $\left(\frac{LL_B(\hat{\beta}_A) - LL_B(0)}{LL_B(\hat{\beta}_B) - LL_B(0)} \right)$	0.99	0.99	0.90
Transfer Index 2 $\left(\frac{LL_A(\hat{\beta}_B) - LL_A(0)}{LL_A(\hat{\beta}_A) - LL_A(0)} \right)$	0.99	0.99	0.99

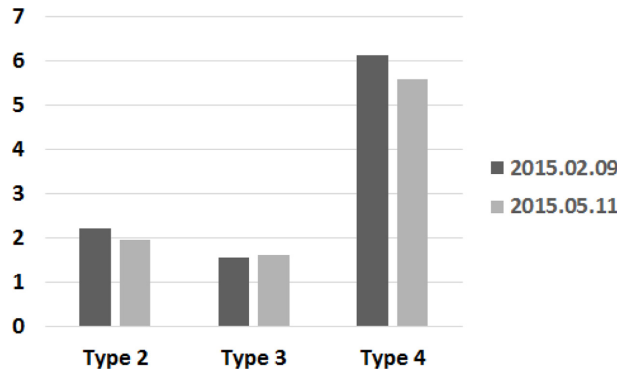


Fig. 5. Marginal rate of substitution of transfer time to in-vehicle time.

가치가 차내시간에 비해 약 2배 높은 기존 연구결과([9,16])와 유사하였다. 하지만, 반대로 출발역에는 급행/일반 모두 정착하고 도착역에서는 일반열차만 정착하는 경우(Type 3)에는 1.5~1.6로 나타났다. 이와 같이 한계대체율이 비대칭성을 가지는 이유는 Type 2에서는 환승을 하지 않더라도 도착역까지 이동이 가능하므로 환승에 대한 저항이 높은 것이고 Type 3에서는 급행열차를 탑승하는 경우 반드시 일반열차로 환승해야하므로 환승에 대한 저항이 상대적으로 낮기 때문이다.

마지막으로 급행열차와 일반열차를 자유롭게 선택 가능한(Type 4)에는 5.5~6.1로 매우 높았다. 따라서, Type 4에 해당하는 O-L 승객은 급행열차의 선호가 매우 높다고 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 급행열차를 혼용하는 노선에서의 경로선택모형 개발 시 급행열차의 정착 유무를 반드시 고려해야한다는 것을 의미한다.

3.2 혼잡도 변화

혼잡도의 일반적인 정의는 차량에 탑승하고 있는 재차 인원을 차량 정원수로 나누어주는 것으로 대중교통운영자에 대한 경영 및 서비스 평가시 평가항목으로 사용 되고 있어 도시철도 운영기관에서는 혼잡도를 측정하고 관리하고 있다[14]. 혼잡도는 1 m²를 2.85명이 점유하는 경우를 혼잡도 100%로 하며 국내 도시철도 건설 시에는 그 기준을 혼잡도 150%로 한다. 따라서, 혼잡도가 150%가 넘어가면 승객들은 혼잡으로 인한 불편을 느끼기 시작한다고 볼 수 있다. 혼잡도 분석은 혼잡도가 가장 높은 시간대인 오전 7:00~9:00 가양역을 출발한 상행열차(2단계 개통 전 급행/일반 13대/13대, 개통 후 14대/14대)를 대상으로 하였으며 4량 1편성을 기준으로 차량 정원은 606명으로 하였다.

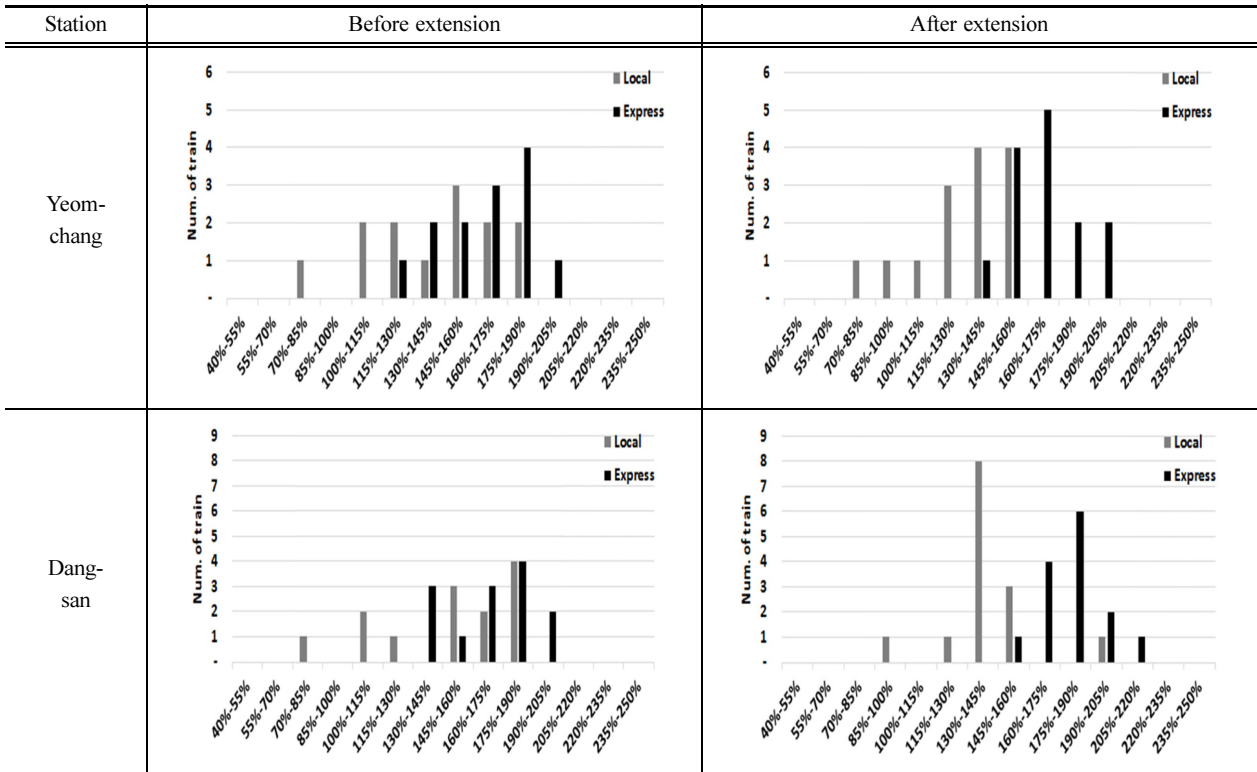
표 7은 2단계 개통에 따른 주요역 혼잡도 변화 분석 결과이다. 일반열차의 혼잡도는 개통 전·후 모두 당산역에서 가장 최대 189%, 193%로 높게 나타났으며 평균적으로 약 8.7% 감소하였다. 이는 2단계 개통으로 인한 일반열차의 수요증가량 보다 1개 열차가 더 투입되어 공급량이 더 크기 때문이다. 급행열차의 경우엔 여의도역에서 가장 높은 혼잡도를 보였으며 개통전보다 평균 혼잡도가 6.7% 증가하였다. 이는 개통 후 급행열차를 1대 추가 투입하였지만, 1단계→2단계 장거리 승객이 증가하였고 장거리 승객의 경우 급행열차의 선택이 높아 수요증가가 공급증대보다 커져서 인해 서비스 품질이 나빠졌다는 것을 확인할 수 있다.

이와 같은 결과는 개통 전·후 염창역 및 당산역의 열차별 혼잡도를 히스토그램으로 분석한 표 8에서 보다 정확하게 확인 할 수 있다. 개통 전에 일반열차와 급행열차간 혼잡도 차이는 그리 크지 않는 반면에 개통 후에는 일반열차의 혼잡도는 크게 낮아

Table 7. Summary of the results on load factor.

Station		Maximum / Average load factor(%)			
		Gayang	Yeom-chang	Dang-san	Yeouido
Local	Before extension (A)	87 / 69	186 / 141	189 / 151	122 / 68
	After extension (B)	85 / 70	157 / 130	193 / 141	106 / 83
	Change (B-A)	-2 / 1	-11 / -11	4 / -10	-16 / -15
Express	Before extension (A)	162 / 132	192 / 165	199 / 168	219 / 180
	After extension (B-A)	159 / 133	204 / 169	211 / 178	219 / 192
	Change (B-A)	-3 / 1	12 / 4	12 / 10	- / 12

Table 8. Results of load factor analysis per train-set.



진 반면 급행열차의 혼잡도는 높아져 두 열차간 혼잡도 차이가 심해졌다. Transit Capacity and Quality of Service Manual[15]에서는 급행-일반 열차를 혼용 운영하는 경우 탑승량 균형(load balance)을 핵심요소로 제시하고 있다. 따라서, 급행열차의 추가 투입과 같은 열차운영 계획을 통해 일반열차의 혼잡도를 일정한 수치내로 유지하면서 급행열차의 혼잡도를 완화하는 방안이 검토되어야 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 교통카드 자료를 바탕으로 9호선 개통 전·후 승객의 급행열차 선택에 대한 변화를 분석하였다. 분석결과 연장 개통 후에 1단계 구간 승객의 열차 선택은 변화하지 않았다. 이를 개통 전·후 경로선택 모형의 전이성을 통해 확인하였다. 다만, 연장 개통으로 인하여 1단계에서 2단계 구간 사이를 이동하는 승객의 경우 출/도착역이 급행열차가 정차하는 승객의 비율이 높고 이동거리가 장거리이기 때문에 급행열차의 수요 증가가 일반열차의 수요 증가에 비해 상대적으로 높았다. 그 결과 개통 후 급행열차의 혼잡도는 약 6.7% 증가하였고 일반열차와의 혼잡도 차이가 커짐을 확인하였다. 그리고 본 연구에서 개발한 다항로짓 모형은 타 노선의 급행열차 운영 효과를 분석하는데 활용이 가능할 것으로 판단된다.

향후 연구로는 9호선 급행열차의 혼잡도를 완화하는 열차운영계획에 관한 연구와 장기간에 걸친 데이터를 확보하여 노선 연장에 따른 수요 변화를 분석하는 연구가 필요하다. 또한, 노선 연장으로 인한 승객들의 통행발생 시간대 변화 및 연장 노선 길이에 따른 통행행태에 대한 변화 분석 등이 있다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] K.M. Kim, S.M. Oh, S.-P. Hong, S.-J. Ko (2015) Tracing a logical path of passengers : A case study of Seoul Metro Line 9, *Journal of the Korean Society for Railway*, 18(6), pp. 586-595.
- [2] S.-P. Hong, Y.H. Min, M.J. Park, K.M. Kim, *et al.* (2015) Precise estimation of connections of metro passengers from Smart Card data, *Transportation*, Advance online publication, 43 pp. 749-769.
- [3] H.-S. Shin, S.-Y. Chung, M.-S. Kim (2011) A study on the second phase operating patterns for taking into consideration the first phase transport demand of line 9, *Annual Conference of the Korean society for railway(Spring)*, Hoengseong, 498-508.
- [4] M.R. Kim, D.S. Moon, Y.M. Lee (2012) After the opening of the extended section (Onsu~Pupyong) in Subway Line No. 7, *Annual Conference of the Korean society for railway(Spring)*, Mokpo, 984-989.
- [5] D.-S. Lim, I.-H. Shin (2013) A primary study for the extension standard of urban & commuter rail line, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 61(4), pp. 92-94.
- [6] O.S. Ji (2003) Validity of designating line extension project in Seoul as metropolitan railroad. Gyeonggi Research Institute, CEO Report.
- [7] L. Mejia-Dorantes, A. Paez, J.M. Vassallo (2012) Transportation infrastructure impacts on firm location: the effect of a new metro line in the suburbs of Madrid, *Journal of Transport Geography*, 22, pp. 236-250.
- [8] F. Calvo, J. de Ona, F. Aran. (2013) Impact of the Madrid subway on population settlement and land use, *Land Use Policy* 31, pp. 627-639.
- [9] K.M. Kim, S.-P. Hong, S.J. Ko, D. Kim (2015) Does crowding affect the path choice of metro passengers?. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 77, pp.292-304.
- [10] E. Hideshima, N. Koike, K. Yamamoto, H. Hadase (2000) Train operation with arranging conflicts between commuters and travelers in railroad transport to and from a metropolitan airport. *In Proceedings of IEEE International Conference of Systems, Man and Cybernetics*, Nashville, pp. 566-571.
- [11] M. Bierlaire (2003) *BIOGEME: a free package for the estimation of discrete choice models*. *Swiss Transport Research Conference*, Monte Verita, Ascona, pp.1-24.
- [12] F.S. Koppelman, C.G. Wilmot (1982) Transferability analysis of disaggregate choice models. *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, 895, pp. 18-24.
- [13] R. Champleau, L. Pierre, K.G. Baass (1987) A posteriori impact analysis of a subway extension in Montreal. *Centre de recherche sur les transports*, Université de Montréal, 1152.
- [14] K.M. Kim, S.M. Oh (2015) Evaluation of load factor on metro using smart card data in skip-stop operation, *Annual Conference of the Korean Society for Railway(Spring)*, Mokpo, 984-989.
- [15] Transportation Research Board of the National Academies (2013) *Transit capacity and quality of service manual*, 3rd edition. Transportation Research Board, Technical Report TCRP Report 24 165.
- [16] C.H. Yang, E.-Y. Shon (2000) Estimation of transfer related values of Seoul subway users using stated preference and revealed preference analyses, *J. Korean Soc. Transport.*, 18(4), pp. 19-30.
- [17] Y. Asakura, T. Iryo, Y. Nakajima, T. Kusakabe (2012) Estimation of behavioural change of railway passengers using smart card data. *Public Transport*, 4, pp. 1-16.
- [18] J. Baek, K. Sohn (2016) An investigation into passenger preference for express trains during peak hours. *Transportation*, 43(4) pp. 623-641.
- [19] K.M. Kim, S.-P. Hong, S.-J. Ko, J.H. Min (2016) Predicting Express-Train Choice of Metro Passenger from Smart Card Data. *Transportation Research Board 95th Annual Meeting*. Transportation Research Board, 16-5400.
- [20] S. Sikder, A.R. Pinjari, S. Srinivasan, R. Nowrouzian (2013) Spatia transferability of travel forecasting models: a review and synthesis, *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*, 5(2-3), 104-128.

(Received 17 June 2016; Revised 15 July 2016; Accepted 10 October 2016)

Kyung Min Kim : kmkim@krri.re.kr

Rail Traffic & Mobility Research Team, Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Korea

Suk Mun Oh : smoh@krri.re.kr

Rail Traffic & Mobility Research Team, Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Korea

Hag Lae Rho : hlrho@krri.re.kr

Rail Traffic & Mobility Research Team, Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Korea