

서울시 혼잡 지하철역의 승하차 시간 분석

An Analysis of the Passenger Flow Time in the Congested Subway Stations

오석문*
Oh, Seog-Moon

ABSTRACT

The dwell time and the passenger flow time are surveyed on the definition, affecting factors, several conclusions, and the forecasting models based on the regression. Also, the results of the field survey and analysis are presented for the congested subway stations in Seoul. It is claimed that the comprehensive research should be fulfilled on the passenger flow for the Korean case itself, since the results are quite different from the results from [1]. Moreover, the result is a important factor for the economic assessment of construction or renewal of the rail line.

1. 서론

새로운 열차 시스템을 도입하기 위해서는 경제적 타당성을 면밀하게 검토해야 한다. 대도시권 신설 노선의 경제적 타당성은 투자된 '비용(Cost)' 대비 '효과(Benefit)'를 비교하는 하는 것이 일반적인 절차이다. 이때, 노선의 운영 시스템에 따른 운전시격은 '효과' 부분을 설명하는 중요한 요소이다.

대도시권에서 운행되는 지하철 열차의 운전시격(Headway)은 정차시간(Dwell), 열차간격(Separation) 및 여유시간(Margin)으로 구성되며, 이중 정차시간이 가장 중요한 요소이다. 그림 1은 길이가 180m 정도인 열차가 3현시의 자동폐색시스템에서 운행될 경우, 운전시격을 구성하는 예를 나타낸다. 이 경우 운전시격은 110초 ~ 125초이다[1].

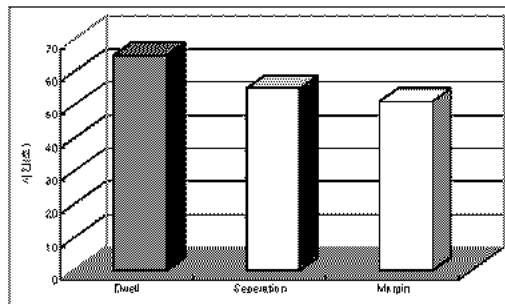


그림 1 대도시권 지하철 열차 운전시격의 구성

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정희원

정차시간에 대한 기존의 연구들은 다음과 같이 3가지 분야로 나누어진다. 첫 번째 분류의 연구는 정차시간을 열차 운행가능 횟수를 계산하는 요소로 고려하는 관점이다. 두 번째 분류의 연구는 정차시간을 승객의 탑승시간과 대기시간을 연관 지어 분석하는 것이다. 이 분야의 연구에서는 승객의 승하차 시간에 대한 선형 회귀분석 모형을 제공하는 것이 목적이 된다. 마지막 분류의 연구에서는 "실제적으로 1시간에 얼마나 많은 열차들이 한 지점을 통과할 수 있는가?"와 "정차시간이 열차의 운행가능 횟수에 미치는 영향이 무엇인가?"에 대한 답을 제시하는 목적의 연구들이다. 그러나 이러한 세 가지 분야의 연구들은 서로 밀접하게 연관되는 결과를 제시한다.

본 논문에서는 승하차 시간의 분석결과를 경제적 타당성 평가에 적용하는 절차를 서울시 혼잡 지하철역의 실측 사례를 중심으로 설명한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2절에서는 국내의 대도시권 지하철 열차의 정차시간과 승하차 시간에 대해 전반적으로 설명한다. 제3절에서는 서울시 혼잡 지하철역에서 승하차 시간의 실측 사례를 설명한다. 마지막으로 4절에서는 결론 및 향후방향을 제시한다.

2. 대도시권 지하철 열차의 정차시간과 승하차 시간

2.1 정차시간의 구성

지하철 열차의 정차시간은 일반적으로 승객의 승차 및 하차 시간(Passenger flow times), 출입문이 닫힐 때까지의 시간(Door still open)과 출입문이 닫히고 출발신호를 대기하는 시간(Wait to depart)으로 구분된다.

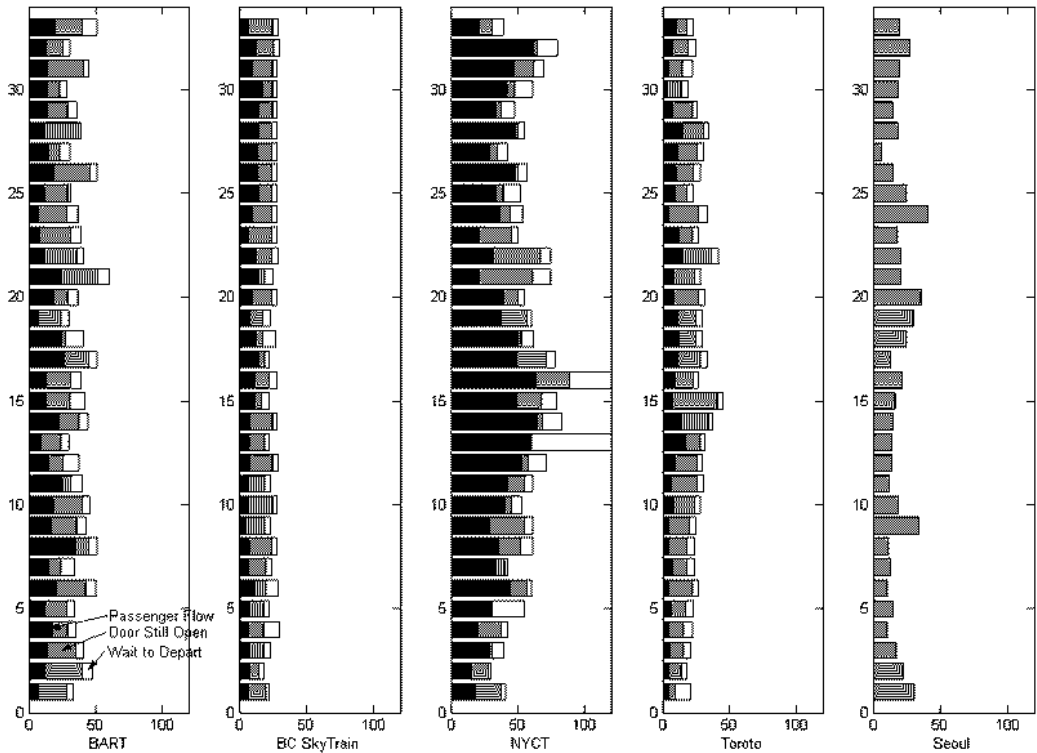


그림 2 국내외 대도시권 열차의 정차시간 비교 및 분석

그림 2는 북미의 주요 대도시권 열차 운행에서 정차시간에 대한 분석 사례[1]와 서울시 지하철의 정차시간에 관한 데이터를 이용하여 구성한 차트이다. 처음 그림은 BART Montgomery 역의 정차시간을 1995년 2월 9일 오

후 피크 시간대에 측정된 것이다. 평균 운전시각은 153초이고, 편속된 승객의 수는 586명, 승하차 시간은 전체 정차시간의 38%도 나타났다. 두 번째 그림은 BC SkyTrain Burrard 역의 정차시간을 1995년 4월 5일 오전 피크 시간대에 측정된 것이다. 평균 운전시각은 151초이고, 편속된 승객의 수는 562명, 승하차 시간은 전체 정차시간의 40%도 나타났다. 세 번째 그림은 NYCT Grand Central 역의 정차시간을 1995년 2월 8일 오전 피크시간대에 측정된 것이다. 평균 운전시각은 160초이고, 편속된 승객의 수는 1,143명, 승하차 시간은 전체 정차시간의 64%도 나타났다. 네 번째 그림은 Toronto King 역의 정차시간을 1995년 2월 6일 오전 피크시간대에 측정된 것이다. 평균 운전시각은 168초이고, 편속된 승객의 수의 428명, 승하차 시간은 전체 정차시간의 31%로 나타났다.

마지막 다섯 번째 그림은 2004년 7월 2일 오후 피크시간대와 7월 5일에 오전 피크시간대에 서울시 지하철 4호선 열차가 운행되는 구간에서 측정된 것이다. 이 그림에서는 출입문이 닫힐 때까지의 시간에 대한 데이터만 제시되었다. 서울시 지하철의 경우, 일반적으로 180초의 운전시각에 따라 계획되고, 피크시간대에는 150초까지 단축된다. 주어졌던 데이터만을 기준으로 볼 때, 서울의 경우는 'BC SkyTrain'과 'Toronto'와 유사한 패턴을 보이고 있지만, 총 승하차 승객의 규모 면에서 비교되지 못하여, 국내의 지하철 열차의 승하차 패턴에 대한 전반적인 결론을 도출하기에는 아직 자료가 부족한 실정이다. 그림2에 제시된 분석으로부터 얻을 수 있는 결론은 다음과 같다.

(분석 1) 승하차 시간은 전체 정차시간의 30%~60%를 차지하고, 승하차 승객의 수가 많을수록 그 비율은 증가한다.

2.2 승하차 시간

앞 절에서 승하차 승객의 수가 많을수록 정차시간에서 승하차 시간이 차지하는 비율이 높아간다는 결론을 제시하였다. 대도시권 지하철 열차의 승하차 시간은 다음과 같이 정의된다.

(정의 1) 승하차 시간 = 승객 1명이 하나의 승하차열을 통해서 열차 출입문의 문턱을 통과하는데 소요되는 시간을 초로 표시한 것. (Time in second for a single passenger to cross the threshold of the rail transit car doorway, entering or exiting, per single stream of doorway width.)

승하차 시간에 영향을 미치는 인자는 매우 다양하다. 예를 들어, 부드러운 날 에이컨을 가동하는 차량은 승하차 시간을 단축하고, 탑승률을 개선하며, 낮은 풍량차량과 신형 경량차량간의 승하차 시간은 필연적으로 거의 차이가 없는 것으로 보고되었다. 출입문의 폭이 승하차 시간에 미치는 영향에 대해서는 다양한 통계분석을 시도하였으나 아직까지 유의한 결과를 얻지 못한 사례가 없다. 동일본 철도(JR-East)의 광폭 출입문 차량과 Miami Metromover는 모두 2.4m에 달하는 광폭 출입문을 설치하여 4열(Quadruple doorway streams)의 승하차열로서 승하차 시간을 단축을 시도하였다.



그림 3 JR 동일본의 광폭 출입문 차량



그림 4 Miami Metromover

일반적인 승하차열의 형성은 초기에 2열의 흐름이 형성되나, 도중에 1열이나 3열로 자연히 전환된다. 승하차 시간에서 탑승시간과 하차시간의 양상은 비슷하게 하다. 승하차 시간에 영향을 미치는 각각의 요소들에 대해 분석

한 결과의 사례들을 제시한다[1].

(분석 2) 승차 시간은 하차 시간에 비해 중요한 정도로 길다.

(분석 3) 대도시권 열차에서 고상홈이 설치된 역에서의 승하차 시간이 설치되지 않은 역에서의 승하차 시간보다 짧게 나타난다.

(분석 4) 일상운행과 특별 행사가 있는 경우의 승하차 시간을 비교하는 것으로 특별행사가 있는 경우의 승하차 시간이 매우 중요한 정도로 짧았는데, 이것은 승객의 자발적인 요소인 것으로 판단된다.

(분석 5) 도시별 및 시스템별 승하차 시간의 편차는 매우 중요한 정도로 크게 나타난다.

(분석 6) 시간대별 비교에서 아침 시간대의 승하차 시간은 오후 시간대의 승하차 시간에 비해 다소 길게 나타난다.

(분석 7) 탑승률에 따른 비교에서 탑승률이 높은 경우의 승하차 시간은 낮은 경우의 승하차 시간에 비해 매우 중요한 정도로 길게 나타난다.

그림 5는 BC Transit의 1994년부터 1995년 걸친 관찰 결과를 요약한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 승하차 비율이 비슷하게 혼합된 (Mixed) 역의 승하차 시간이 승차 또는 하차의 비율이 높은 역에서의 경우 보다 짧게 나타난 것으로 보고되었다. 승하차 비율이 비슷한 역에서 피크 때의 승하차 시간은 대략 2.2초, 피크의 외 시간대에서 승하차 시간은 2.0초 정도로 나타났다. 반면, 하차 승객이 많은 역(70% 이상의 승객이 하차하는 역)에서 피크 때 승하차 시간은 1.4초, 승차 승객이 많은 역(70% 이상의 승객이 하차하는 역)에서 피크 때 승하차 시간은 1.9초 정도로 나타났다. 축구 시합 (Football)이 있는 하차 승객이 많은 역의 경우 승하차 시간은 1.6초, 록 공연이 있는 하차 승객이 많은 역의 경우 승하차 시간은 1.8초 정도로 보고되었다.

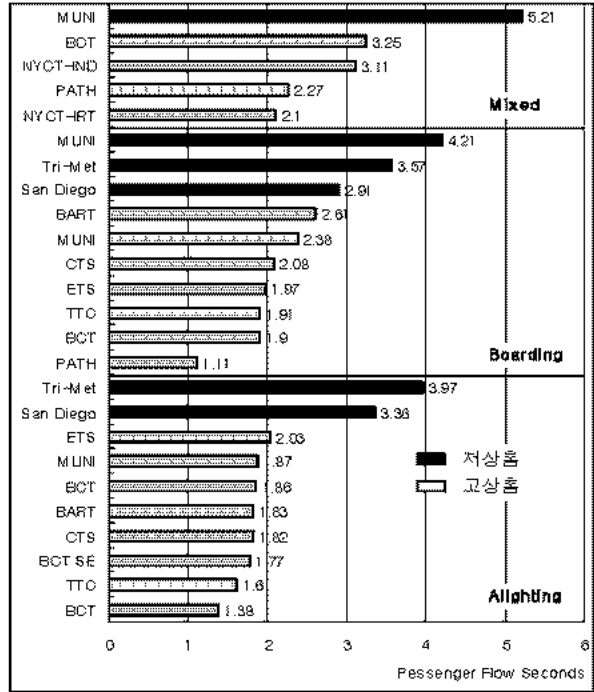


그림 5 BC Transit 승하차 시간의 형태 분석 사례

2.3 승하차 시간 예측 모형

이 절에서는 승하차 시간 예측 모형에 대해서 설명한다. 대도시권 지하철 열차의 승하차 시간의 예측 방법에 대한 학술적인 연구는 저자의 전례 내에서 매우 제한적으로 실시되었다. Andre Puong (2000)의 Working Paper [2]와 TCRP Report 13 [1]의 연구는 모두 승하차 시간에 대한 회귀분석 모델을 제시하고 있다. 주요한 차이점은 TCRP Report 모형은 경우 각각의 상황에 맞추어 여러 가지가 개발된다는 점이다. 그 모형의 주요 내용은 다음과 같다.

$$\ln(\text{flow time mainly alighting}) = 1.302 + 0.147B + 0.105A - 0.00511B^2 - 0.00165A^2 + 0.653SN$$

$$\ln(\text{flow time mainly boarding}) = 1.072A + 0.124B + 0.104A - 0.00194B^2 - 0.00153A^2 + 0.0782SN$$

$$\ln(\text{flow time mixed}) = 1.363 + 0.106B + 0.0864A - 0.00235B^2 - 0.00159B^2 + 0.0563SN$$

여기서, A = 고상홈에서 단일 출입문을 통해 단일 하차열로 하차하는 승객수,

B = 고상층에서 단일 출입문을 통해 단일 승차열로 승차하는 승객수,
 SN = 차량 양당 입석승객의 수.

이 모델은 고상층에서 단일 출입문의 단일 승차하열을 기준으로 개발된 모델이다. 따라서 저상층을 이용하는 경우, 강쪽 출입문의 경우, 또는 2층 전동차와 같이 승하차 출입구가 제단 형태인 경우에 대해서는 추가적인 모델의 개발이 필요한 상황이다.

3. 서운시 혼잡 지하철역의 승하차 시간

3.1 승하차 시간 실태 분석

우리나라 대도시권 지하철역 열차의 승하차 시간에 대한 실태를 조사하기 위해, 서운시 지하철역공사의 2호선 구간에서 간단한 관측을 실시하였다. 관측은 2004. 6. 25. 18:00경부터 20:30경까지 비디오카메라를 이용하여 해당 구간의 혼잡역(광진역, 광성역, 강남역, 교대역, 진도원 역)에서 지하철 승객의 승하차 실태를 촬영하는 것으로 이루어 졌다. 촬영한 자료는 부록 1에 정리하였다.

그림 7은 부록에 나타난 31회의 관측 데이터를 이용하여 작성한 승하차 시간에 대한 분포를 히스토그램의 형태로 나타낸 것이다. 승하차 시간의 분포함수는 대체적으로 Log-Normal 분포함수를 따르다고 알려져 있는데, 그림 7은 Log-Normal 분포함수와 유사한 형태를 보인다.



그림 6 서운시 2호선 혼잡역의 승하차 실태

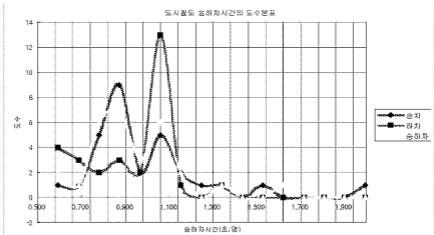


그림 7 서운시 2호선 혼잡역의 승하차 시간에 대한 분포

표 1 서울시 2호선 혼잡역의 승하차 시간 통계자료

구분		승차시간 (초)	하차시간 (초)	승하차시간 (초)	비고
비혼잡	Max	1.900	1.000	1.536	비혼잡 열차에서 승객은 여유를 가지고 천천히 승하차 한다.
	Min	0.500	0.588	0.591	
	Mean	0.971	0.918	0.940	
극혼잡	Max	1.273	1.273	1.040	극도로 혼잡한 열차에서는 승하차 시간이 증가한다.
	Min	0.524	0.583	0.556	
	Mean	0.891	0.825	0.852	
혼잡	Max	1.000	1.000	0.923	혼잡 열차에서 승객은 줄을 서서 빨리 탑승한다.
	Min	0.733	0.571	0.727	
	Mean	0.830	0.834	0.819	

표 1은 서울시 2호선 혼잡역의 승하차 시간에 대한 자료를 요약한 것이다. 관측된 탑승 승객은 310명, 평균 탑승 시간은 0.88초 이었다. 반면, 하차 승객은 233명, 평균 하차 시간은 0.76초로 탑승 시간보다 다소 짧다. 이 결과는 (분석 2)의 결과와 일치한다. 관측된 총 승객은 543명, 평균 승하차 시간은 0.83초 이었다. 이러한 결과들은 BC의 1.4초 ~ 2.2초인 것과 비교해 볼 때 현저하게 다른 결과이다. 이와 같은 차이점은 국내의 대도시권 열차에서 승객들의 거동(Behavior)이 현저하게 다른 뿐만 아니라, 외국에서 개발된 모형과 파라미터들을 국내에 그대로 적용할 수 없다. 따라서 국내 실정에 맞는 모형의 개발과 파라미터의 추정이 필수적이다.

3.2 승하차 시간 분석결과의 활용; 경제적 타당성 평가

승하차 시간에 대한 예측 모형이 만들어지면, 향후 유사한 형태의 노선을 건설할 때 경제적 타당성 검토를 위한 중요한 자료를 제시한다. 앞에서 언급한 바와 같이 대도시권 지하철 열차에서 운전시력은 경제적 타당성에 중요한 영향을 미치고, 운전시력은 다시 정차시간에 의해 크게 좌우되며, 승하차 승객의 수가 많은 역에서 정차시간은 대부분 승하차 시간으로 구성된다. 따라서 승하차 시간은 노선의 신설 또는 개량 사업의 경제적 타당성 평가에 중요한 요소가 된다.

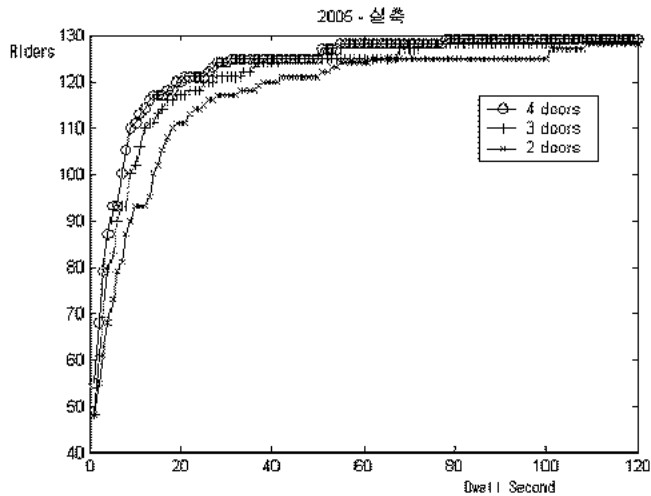


그림 8 정차시간에 따른 승차인원의 변화

그림 8은 승하차 시간 분석결과의 활용 예시이다. 서울시 지하철의 정차시간은 대체로 30초로 설정되고, 서울시

지하철의 전동차 출입문은 량당 4개이다. 이 경우 그림 8에 따르면 120명 이상의 승하차 승객을 처리할 수 있다. 이 때 승하차 시간은 앞 절에서 분석된 결과를 적용한다. 동일한 구간에 출입문의 수가 2개인 차량을 도입하는 경우 처리할 수 있는 승하차 승객의 수는 110~120명 사이로 감소한다. 따라서 출입문이 4개인 차량과 같은 수의 승객을 처리하기 위해서는 정차시간을 60초 가까이 증가시켜야 한다. 이것은 열차의 시격을 현저히 감소시키고, 사업의 경제적 타당성을 악화시키는 요인이 된다. 2층 전동차의 경우 차량의 기계 설제상의 문제 때문에 출입문의 수를 자유롭게 증가시키지 못하는 제약이 있다. 이러한 경우 승하차 승객의 원만한 처리와 경제적 타당성을 최적화하기 위한 적절한 타협점(Trade-off)을 찾아야 한다.

4. 결론 및 향후방향

본 논문에서는 승하차 시간에 대한 정확한 분석이 노선의 신설 및 개량 사업의 경제적 타당성 조사에 필수적인 항목임을 주장하고, 승하차 시간에 대한 분석결과가 경제적 타당성 평가에 활용되는 예시를 제시하였다. 본 논문의 전반부에서 대도시권 열차의 정차시간을 구성하는 요소들을 설명하고, 국내의 대도시권 열차들의 정차시간 구성형태를 비교하였다. 특히, 승하차 승객의 수가 많을수록 정차시간은 승하차 시간에 좌우된다는 분석 결과를 제시하였다.

승하차 시간에 대한 엄밀한 정의를 제시하고, 승하차 시간에 영향을 미치는 요소들을 외국의 사례로부터 제시하였다. 특히, 고상홈의 영향, 특별 행사의 영향, 지역간 및 시스템간의 영향, 시간대별 영향 및 탑승률별 영향 등에 대한 승하차 시간의 변화 형태를 제시하였다. 또한, 승하차 시간 예측 모형의 외국사례를 제시하였다. 그러나 이러한 모형과 파라미터를 국내에 적용하기 위해서는 국내 실정에 맞도록 조정하는 연구가 필요함을 언급하였다.

다음으로, 서울시 혼잡 지하철역에서 승하차 시간의 실측 및 분석 사례를 제시하였다. 유사한 경우의 외국사례와 비교해 볼 때 승하차 시간의 차이가 현저함을 확인하였고, 국내실정에 맞는 연구의 필요성을 제시하였다. 마지막으로 승하차 시간이 노선의 신설 및 개량 사업의 경제적 타당성에 어떠한 영향을 미치며, 어떻게 활용할 수 있는지에 대한 예시를 제시하였다.

본 논문에서의 언급한 실측실험은 매우 간략한 형태로 실시되었다. 향후 좀 더 광범위한 실측과 데이터를 활용하고 체계적인 실험계획에 따른 조사 분석이 필요할 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

1. TCRP Report 13, Transportation Research Board, USA.
2. Andre Puong, Dwell Time Model and Analysis for the MBTA, Working Paper, 2000. 3. 30.

부록. 환승 데이터

역명	열차	혼잡도	1인당 승차시간(초)	1인당 하차시간(초)	1인당 승하차시간(초)	승차(명)	하차(명)
잠실역	1	비혼잡	0.900	1.000	0.813	10	2
잠실역	1-1	비혼잡	0.500			4	
잠실역	2	비혼잡	1.167	1.000	1.077	6	7
잠실역	3	비혼잡	1.000	1.000	1.000	3	4
삼성역	4	비혼잡	1.000	0.667	0.800	2	3
삼성역	5	비혼잡	1.900	1.000	1.563	6	10
삼성역	6	혼잡	0.833	0.875	0.857	6	8
삼성역	7	혼잡	0.786	1.000	0.800	14	1
삼성역	8	비혼잡	0.700	1.000	0.727	10	1
삼성역	9	혼잡	1.000	0.714	0.923	12	14
삼성역	9-1	혼잡		1.000			1
삼성역	10	혼잡	0.800	1.000	0.857	15	6
삼성역	11	비혼잡	1.000	0.800	0.923	8	5
삼성역	12	비혼잡	0.714	1.000	0.733	14	1
삼성역	13	비혼잡	1.143	1.000	1.125	7	1
삼성역	14	비혼잡	0.833	1.000	0.929	6	8
삼성역	15	비혼잡	1.000	1.000	1.000	7	1
삼성역	16	혼잡	0.800	0.571	0.727	15	7
강남역	17	비혼잡	0.778	1.000	0.789	18	1
강남역	18	극혼잡	1.273	0.812	1.000	11	16
강남역	19	극혼잡	0.727	0.583	0.652	11	12
강남역	20	혼잡	0.857	0.600	0.789	14	5
강남역	21	극혼잡	0.917	1.083	1.000	12	12
강남역	22	극혼잡	0.857	1.273	1.040	14	11
교대역	23	극혼잡	1.091	0.800	1.000	11	5
교대역	24	비혼잡	0.800	0.714	0.750	5	7
교대역	25	극혼잡	0.846	0.636	0.714	13	22
교대역	26	극혼잡	0.524	0.583	0.556	21	24
교대역	27	혼잡	0.733	0.909	0.780	30	11
교대역	28	비혼잡	0.600	0.588	0.591	5	17
신도림	29	비혼잡	1.500	1.000	1.300	6	4