도시철도 운행역에서의 정차시분 추정에 관한 실증연구

Experimental Study on the Estimation of Station Dwell Time for Metro Railways

김동희*　　홍순흠**

Kim, Dong-Hee　　Hong, Soon-Heum

ABSTRACT

In crushed service areas of Metro railway lines, there are problems such as the buildup discontent, the irregular operation time and rotation of rolling stocks, caused by frequently occurred train delay. Train delay is affected by operation conditions or infrastructure capacities such as train schedule, line capacity, car rotation plan, shunting movements at origin and destination, and also by transport demand characteristics. Furthermore, a delay produce another delays and spread over the following trains. So it is not easy to build up a protection and recovery plan.

In this research, we conduct experimental analysis study based on the real metro data, and as a result, present the relation between the traffic demand and the dwell time. And finally, propose future research themes for improving the operation efficiency of metro railways.

1. 서 론

수도권 도시철도 일부구간에서는 출퇴근 시간대 혼잡에 따라 열차가 상습적으로 지연되어 정시운행의 보장 미비 등으로 이용승객의 불만이 증가되고 있으며, 철도차량, 승무원 등 자원의 효과적 운영에 문제가 발생되고 있다. 특히 수도권 도시철도 중 S사가 운영하고 있는 4개 노선은 출퇴근 이용승객이 가장 많으며, 그 중 2호 노선은 순환선으로 17개 환승역, 2개 지선을 포함하고 있어 출퇴근 혼잡지연 문제가 가장 심각한 노선이다. S운영사 4개 노선 전체 일일 수송인원은 3,944천명이고, 그 중 2호 노선이 1,898천명을 수송하고 있어 4개 노선 전체의 48%를 분담하고 있다.

열차지연은 열차운행스케줄, 선로용량, 차량운용계획, 선로형태, 시종착역에서의 입환, 여객수요 및 승객의 시·공간적 분포 등 승객현황과 철도자원 및 운영규정 전체의 영향을 받을 뿐만 아니라 지연 자체가 원인이 되어 확산되는 특이한 특성을 가지고 있어 지연확산 방지 및 회복방안의 수립이 쉽지 않은 실정이다. 따라서 이의 해결을 위한 수요특성, 혼잡도 특성과 열차운행 및 지연간의 연관효과 특성에 관한 체계적 분석연구가 반드시 필요하며, 이를 통해 대규모 투자가 수반되는 인프라 개량·증설 이전에 투자 대비 효과가 큰 운영체계 및 시스템의 개선이 선행되어야만 할 것이다.

본 연구에서는 승객수요와 혼잡도가 도시형 메트로 열차의 운행시격 및 지연에 어떻게 영향을 주는지 실증적 모델을 구축하고 S운영사 2호 노선의 실제 데이터를 이용하여 수치분석 사례를 제시하고자 한다. 또한 수요, 혼잡도의 변화에 따른 영향 민감도 분석결과를 제시하고, 향후 도시형 메트로 철도의 운영개선을 위해 필요한 연구개발 방향을 제안한다.

* 정회원, 한국철도기술연구원 철도교통물류연구실 선임연구원
E-mail : kdh777@krri.re.kr
Tel : 031)460-5483　Fax : 031)460-5499
** 정회원, 한국철도기술연구원 철도교통물류연구실 책임연구원

2. S 운영사 노선운행 현황

S운영사는 4개 노선 구간을 운영하고 있으며, 1호 노선은 서울역~청량리구간, 2호 노선은 성수~성수순환구간, 3호 노선은 지축~수서구간, 4호 노선은 당고개~남태령구간을 담당하고 있다. 이들 4개 노선의 총 영업거리는 134.9km이며, 115개 역을 포함하고 있다. 해당구간을 운행하는 열차횟수는 지역간 타 운행사 차량을 포함하여 1,861개 열차이며, 일일 총 운행거리는 65,446km에 달한다. 각 노선별 상세 운행현황은 [표 1]과 같다.

표 1 . S운영사 담당노선별 기본운행현황

구 분		계	1호선	2호선	3호선	4호선
운행구간		-	서울역~청량리	성수~성수 (지선포함)	지축~수서	당고개~남태령
운행시간		05:30 ~ 01:00				
영업거리 (km)		134.9	7.8	60.2	35.2	31.7
역 수		115	9	49	31	26
운행 시격	R.H	2.5~3.0	3.0	2.5	3.0	2.5
	N.H	4.0~6.0	4.0	5.5	6.0	5.0
운행횟수/일 (철도공사)		1,861 (770)	126 (506)	1,037	338 (102)	360 (162)
운 행 편성수	R.H	171	13	75	42	41
	N.H	90	8	39	22	21
표정속도 (km/h)		34.3 (지선포함)	31.2	33.6 (지선제외)	34.0	35.8
운행거리 (km/일)		65,446.0	6,243.8	28,544.0	15,377.0	15,281.2

S운영사는 일 평균 3,912천명, 년 평균 1,427,728천명에 달하는 승객을 수송하고 있으며, 이중 특히 2호 노선구간에서만 평균 48%의 승객을 서비스하고 있다. 2호 노선 구간의 5개 주요 혼잡역에서의 평균정차시분은 외선 55초, 내선 40초를 보이고 있으며, 내선의 경우보다 외선의 경우 정차시분이 더 소요되고 있다. 07년 실제운행실적으로부터 산정된 주요역에서의 지연시분을 살펴보면 [표 2]와 같다. 여기에서 실제 승객이 체감하는 지연시분은 승객의 실제 탑승하는 구간에 대한 지연시간으로 봐야할 것이다. 예를 들어 신도림-삼성구간을 탑승하는 승객의 경우 화요일 기준으로 평균 10분 26초의 지연을 체감하게 될 것이다.

표 2 . 계획대비 지연시분

	외선	2.5(월)	1.30(화)	1.31(수)	2.1(목)	2.2(금)	평균
계획대비 지연시분	신도림(A)	0:00:49	0:03:15	0:01:58	0:04:35	0:00:14	0:02:10
	신림(B)	0:03:00	0:07:36	0:03:51	0:04:47	0:01:52	0:04:13
	서울대(C)	0:03:51	0:10:29	0:04:12	0:05:16	0:02:38	0:05:17
	사당(D)	0:05:09	0:12:21	0:05:10	0:05:33	0:04:16	0:06:30
	교대(E)	0:06:10	0:13:08	0:06:12	0:06:04	0:05:14	0:07:22
	삼성(F)	0:07:15	0:13:41	0:07:34	0:06:26	0:06:31	0:08:17
	잠실(G)	0:06:52	0:13:13	0:07:20	0:05:55	0:06:00	0:07:52
	구간지연(F-A)	0:06:26	0:10:26	0:05:36	0:01:51	0:06:17	0:06:07

S운영사 2호 노선 구간에서는 평행다이아 방식으로 열차운행이 이루어지고 있으며, 혼잡시간대, 혼잡역에서의 정차시간 증대는 해당 열차의 후속역에서의 지연 뿐만 아니라 후행열차들에도 연쇄적으로 그 지연이 파급되어 전체 운행의 지연으로 확산되는 특성을 가지고 있다. 또한 탑승수요가 폭발적인 주요 혼잡역에서는 선행열차와의 시격에 따라 탑승수요가 누적될 것이고 따라서 후행열차의 수요는 그 만큼 증가되어 후행열차의 정차지연을 증대시키는 결과는 초래하게 된다. [그림 1, 2]에서는 2호 노선 외선구간의 대표적 혼잡역인 신도림, 강남역에서 시격과 정차시분의 관계를 보여주고 있다.

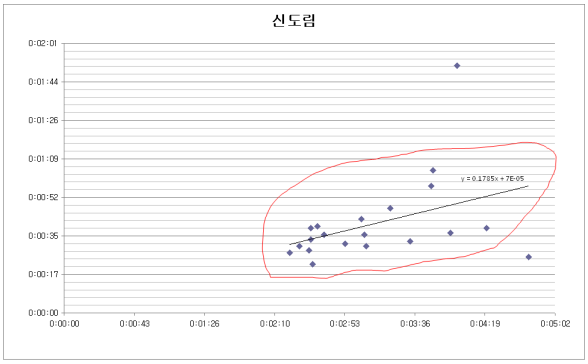

그림 1 . 신도림역의 시격-정차시분 관계

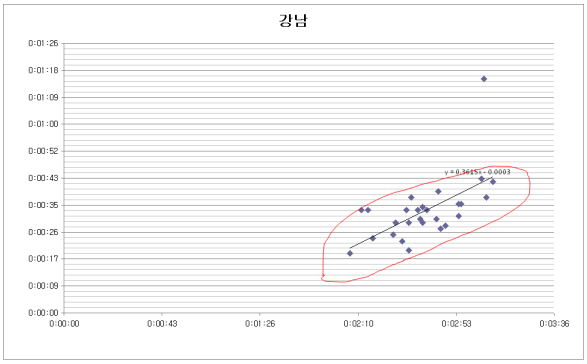

그림 2 . 강남역의 시격-정차시분 관계

따라서 메트로 도시형 철도에서는 이례적 지연 및 그 파급을 최소화하는 것이 매우 중요한 문제이다. 이를 위해서는 인프라, 차량 들의 성능을 대폭적으로 개선하는 방법과 주어진 인프라 조건하에서 합리적 운행계획의 수립 및 실시간 최적의 운행제어를 통한 운영효율성 증대 방법이 있을 것이다. 최근 해외 철도선진국에서는 투자 대비 효과가 뛰어난 운영효율성 향상 분야의 기술개발 투자를 늘리고 있는 추세이다.

3. 환승 및 유입유출을 고려한 승하차시분 추정

도시철도 구간에서의 지연의 발생 및 파급확산영향 최소화를 위해서는 지연과 관련된 지표들을 정확히 정의 및 산정할 수 있어야만 한다. 일반적으로 지연 관련 지표는 실제운행 혹은 운행시나리오의 운영결과와 운영계획 간의 차이를 계산함으로서 산정할 수 있다. 예를 들어 [표 2]에서의 수치는 실제 운행기록결과로부터 운행계획(시각표)간의 차이를 계산한 것이며, 따라서 정확한 지연계산을 위해서는 비교 기준인 운행계획이 타당해야 한다. 지역간 철도의 경우 운행노선 각 구간의 이상적 운전시분을 TPS를 통하여 계산한 후, 여러 운영요건을 고려하여 조정(운행시분)하고 역별 정차시분을 반영하여 운행계획(다이아)을 작성하게 된다. 지역간 철도의 운행에서는 구간별 운행시분이 주요한 부분이지만, 도시형 철도 특히 빈번한 운행을 하는 메트로 철도의 경우에는 각 역에서의 정차시분이 가장 큰 영향요인이게 된다. 따라서 메트로 철도에서는 운행계획에 각역별 수요특성을 고려한 관리 가능 목표치로서 정차시분(동적정차시분)이 반영되어야 하며, 운행 중 변동사항에 대한 실시간 제어(관제)시에도 동적정차시분이 반영된 향후 파급변화를 고려하여야 할 것이다. 이를 위해서는 실제 수요특성을 반영한 정차시분의 추정과 이들 정차시분의 목표관리 수준에 따른 파급영향에 대한 분석이 반드시 수행되어야 할 것이다.

본 연구에서는 S운영사의 2호 노선과 관련된 실제 가용한 데이터를 기반으로 역별/시간대별 수요특성을 고려하여 모수기반의 정차시분을 추정하고, 이들의 관리수준 목표에 따른 운행 파급영향을 실험적 방법으로 제시하고자 한다. 현재 가용한 데이터는 주요 환승역의 일일 환승인원, 역별/시간대별 유입/유출실적, 운행계획(다이아)이다. 이로부터 바로 동적정차시분 추정은 불가능하며, 몇 가지 전제가정과 모수기반의 모델 및 추정모수들이 필요하게 된다. 본 연구에서 사용한 동적정차시분 추정을 위한 단계는 다음과 같다 ;

- 역별 일일 환승승객수의 시간대/승하차별 배분
  - · 환승역별 일일 환승객수를 시간대/승하차별 유입유출승객수 비율대로 배분
- 배분 환승승객수 및 유입유출 승객수 합산
  - · 시간대/승하차별로 배분추정된 환승객수와 집계된 시간대/승하차별 유입유출승객수의 합산

- 운행빈도 및 실적 기반의 초당 유입유출승객수 추정
  - · 합산된 승하차승객수를 열차운행계획상의 빈도와 시격을 고려하여 역별/내외선별/시간대별 시격초당 승하차승객수 추정
- 역 혼잡 정도에 따른 분류 모수 설정
  - · 승하차 혼잡도를 기존 연구결과(오석문, 1999)의 개념에 따라 극혼잡, 혼잡, 비혼잡으로 구분
- 역 혼잡 분류별 인당 승하차소요시간 및 추가제어시간 모수 설정
  - · 시격초당 승하차승객수 수준에 따라 혼잡도 구분(사례에서는 2.0 이상 극혼잡, 1.0 이하 비혼잡으로 분류적용)
  - · 도어제어시간은 극혼잡 10초, 혼잡 8초, 비혼잡 6초로 구분(개폐시간의 합계)
- 역 혼잡 분류별 혼잡분산 평준화율 모수 설정
  - · 승하차승객이 40개의 승하차도어에 균등 분산되었을 때를 100%으로 가정하고, 혼잡도에 따라 평준화율 차별 적용(사례에서는 극혼잡, 혼잡, 비혼잡시 200, 180, 150%를 적용)
- 시간대/시격별 소요 최소정차시분 추정
  - · 기존 연구결과(오석문, 1999)에서 제시된 극혼잡, 혼잡, 비혼잡별 인당 승하차소요시분을 적용
  - · 시간대별 시격초당 소요승객수와 인당 승하차소요시분, 제어시간을 고려한 승하차소요시분 추정

앞에서 추정된 역별 시간대별 승하차소요시분의 예가 [그림 3]에 제시되어 있으며, 혼잡도의 분류기준과 혼잡도에 따른 제어시간 및 평준화율을 달리 적용할시 다른 결과가 추정될 수 있다.

		<시격초당 유입승객수>			<시격초당 유출승객수>			<시격초당 유출입승객수>			<07-08시 승하차시분 추정>							<08-09시 승하차시분 추정>							<09-10시 승하차시분 추정>						
권제	구분	07-08	08-09	09-10	07-08	08-09	09-10	07-08	08-09	09-10	120	150	180	210	240	270	300	120	150	180	210	240	270	300	120	150	180	210	240	270	300
시 청(2)	내선	0.15	0.18	0.19	1.31	3.38	1.02	1.46	3.56	1.21	14	16	18	19	21	23	24	28	33	37	42	46	51	56	13	15	16	17	19	20	21
	외선	0.15	0.17	0.23	1.31	3.21	1.26	1.46	3.38	1.49	14	16	18	19	21	23	24	27	32	36	40	45	49	53	15	16	18	20	21	23	25
을지입구	내선	0.07	0.09	0.10	0.59	1.90	0.86	0.67	1.98	0.96	9	10	10	11	12	12	13	17	19	21	23	26	28	30	10	11	12	13	14	15	16
	외선	0.07	0.09	0.13	0.56	1.90	1.06	0.62	1.98	1.19	9	9	10	11	11	12	13	17	19	21	23	26	28	30	13	15	16	17	19	20	21
을지3(2)	내선	0.13	0.13	0.18	0.75	2.34	1.15	0.88	2.47	1.32	10	11	12	12	13	14	15	23	26	29	32	35	38	42	14	15	17	18	20	21	23
	외선	0.12	0.13	0.21	0.70	2.34	1.35	0.82	2.47	1.56	9	10	11	12	13	14	15	23	26	29	32	35	38	42	15	17	18	20	22	24	25
을지4가	내선	0.07	0.07	0.09	0.27	1.07	0.60	0.34	1.14	0.69	7	8	8	8	9	9	10	13	14	16	17	18	19	21	9	10	10	11	12	13	13
	외선	0.06	0.07	0.11	0.25	1.07	0.74	0.32	1.14	0.85	7	8	8	8	9	9	9	13	14	16	17	18	19	21	10	10	11	12	13	14	15
동운(2)	내선	0.50	0.59	0.50	1.10	2.87	1.37	1.60	3.46	1.87	15	17	19	20	22	24	26	28	32	37	41	45	50	54	16	18	20	22	25	27	29
	외선	0.47	0.59	0.59	1.03	2.87	1.61	1.50	3.46	2.20	15	16	18	20	21	23	25	28	32	37	41	45	50	54	21	24	27	30	32	35	38
신당	내선	0.41	0.58	0.30	0.25	0.71	0.42	0.66	1.29	0.72	9	9	10	11	12	12	13	14	15	17	18	19	21	22	9	10	11	11	12	13	14
	외선	0.44	0.58	0.35	0.26	0.71	0.50	0.70	1.29	0.85	9	10	10	11	12	13	13	14	15	17	18	19	21	22	10	10	11	12	13	14	15
상왕십리	내선	0.20	0.29	0.13	0.06	0.24	0.10	0.26	0.53	0.23	7	7	8	8	8	9	9	8	9	9	10	11	11	12	7	7	7	8	8	8	8
	외선	0.22	0.31	0.14	0.06	0.25	0.11	0.28	0.56	0.24	7	7	8	8	8	9	9	8	9	10	10	11	11	12	7	7	8	8	8	8	9
왕십리	내선	0.75	1.12	0.53	0.32	0.73	0.36	1.07	1.85	0.89	13	14	15	16	17	19	20	16	18	20	22	24	26	28	10	11	12	13	14	14	15
	외선	0.80	1.12	0.62	0.34	0.73	0.43	1.14	1.85	1.05	13	14	16	17	18	19	21	16	18	20	22	24	26	28	13	14	15	16	17	18	20
한양대	내선	0.06	0.08	0.06	0.19	0.55	0.41	0.24	0.63	0.48	7	7	8	8	8	8	9	9	9	10	11	11	12	13	8	9	9	10	10	11	11
	외선	0.06	0.09	0.07	0.19	0.61	0.44	0.24	0.70	0.50	7	7	8	8	8	8	9	9	10	10	11	12	13	13	8	9	9	10	10	11	11
뚝 섬	내선	0.24	0.35	0.15	0.13	0.44	0.16	0.37	0.79	0.31	8	8	8	9	9	10	10	9	10	11	12	13	13	14	7	8	8	8	9	9	9
	외선	0.27	0.37	0.17	0.15	0.46	0.18	0.42	0.83	0.35	8	8	9	9	10	10	10	9	10	11	12	13	14	15	7	8	8	9	9	9	10
성 수	내선	0.27	0.35	0.21	0.41	1.47	0.45	0.68	1.81	0.66	9	10	10	11	12	12	13	16	18	20	22	24	26	28	9	9	10	11	12	12	13
	외선	0.29	0.36	0.24	0.44	1.54	0.50	0.73	1.91	0.73	9	10	11	11	12	13	14	16	19	21	23	25	27	29	9	10	11	11	12	13	14
건 대	내선	1.42	2.01	0.90	0.61	1.21	0.69	2.04	3.21	1.59	20	23	26	28	31	33	36	26	31	35	39	43	47	51	15	17	19	20	22	24	26
	외선	1.12	2.22	1.18	0.49	1.34	0.90	1.61	3.55	2.08	15	17	19	20	22	24	26	28	33	37	42	46	51	55	21	23	26	29	31	34	37
구 의	내선	0.53	0.71	0.27	0.15	0.35	0.18	0.67	1.06	0.45	9	10	10	11	12	12	13	13	14	15	16	17	19	20	8	8	9	9	10	10	11
	외선	0.42	0.79	0.38	0.12	0.38	0.25	0.53	1.17	0.62	8	9	9	10	11	11	12	13	14	16	17	18	20	21	9	9	10	11	11	12	13
강 변	내선	0.77	1.08	0.53	0.35	0.41	0.36	1.12	1.49	0.89	13	14	15	17	18	19	20	15	16	18	20	21	23	24	10	11	12	13	14	14	15
	외선	0.65	1.19	0.66	0.30	0.45	0.45	0.94	1.64	1.11	10	11	12	13	14	15	16	15	17	19	21	23	24	26	13	14	15	17	18	19	20
성 내	내선	0.29	0.33	0.13	0.17	0.26	0.13	0.46	0.59	0.26	8	8	9	9	10	10	11	9	9	10	10	11	12	12	7	7	8	8	8	8	9
	외선	0.23	0.37	0.18	0.14	0.29	0.17	0.37	0.65	0.35	8	8	8	9	9	9	10	9	9	10	11	12	12	13	7	8	8	9	9	9	10
잠 실	내선	2.20	2.69	1.30	1.03	2.04	1.44	3.23	4.73	2.74	27	31	35	39	43	47	51	34	40	46	52	58	64	70	24	27	31	34	38	41	45
	외선	1.85	3.11	1.73	0.87	2.36	1.92	2.72	5.47	3.65	24	27	31	34	38	41	45	38	45	52	59	66	73	80	29	33	38	43	47	52	57
신 천	내선	0.28	0.36	0.15	0.13	0.17	0.14	0.41	0.53	0.29	8	8	9	9	9	10	10	8	9	9	10	10	11	12	7	8	8	8	8	9	9
	외선	0.23	0.42	0.19	0.11	0.20	0.17	0.34	0.61	0.37	7	8	8	9	9	9	10	9	9	10	11	11	12	12	8	8	8	9	9	9	10
종합운동	내선	0.19	0.25	0.16	0.19	0.28	0.13	0.38	0.53	0.30	8	8	8	9	9	10	10	8	9	9	10	11	11	12	7	8	8	8	9	9	9
	외선	0.17	0.28	0.22	0.16	0.31	0.18	0.34	0.59	0.40	7	8	8	8	9	9	10	8	9	10	10	11	12	12	8	8	9	9	9	10	10
삼 성	내선	0.25	0.26	0.23	0.99	2.40	1.29	1.24	2.65	1.52	13	15	16	18	19	20	22	24	27	30	34	37	41	44	15	16	18	20	21	23	25
	외선	0.21	0.30	0.28	0.84	2.77	1.62	1.04	3.07	1.90	13	14	15	16	17	18	20	26	30	34	37	41	45	49	16	18	21	23	25	27	29
선 릉	내선	0.47	0.51	0.46	1.62	3.89	2.24	2.08	4.41	2.70	21	23	26	29	31	34	37	33	38	44	49	55	61	66	24	27	31	34	38	41	45
	외선	0.42	0.62	0.55	1.44	4.71	2.66	1.85	5.34	3.21	16	18	20	22	24	26	28	37	44	51	58	65	71	78	26	31	35	39	43	47	51
역 삼	내선	0.16	0.20	0.18	0.85	2.54	1.34	1.01	2.74	1.52	12	14	15	16	17	18	19	24	28	31	35	38	42	45	15	16	18	20	21	23	25
	외선	0.16	0.23	0.21	0.85	2.93	1.59	1.01	3.16	1.80	12	14	15	16	17	18	19	26	30	34	38	42	46	50	16	18	20	22	24	26	28
강 남	내선	0.40	0.49	0.39	1.35	2.39	1.59	1.75	2.88	1.98	16	18	20	22	23	25	27	25	28	32	36	39	43	47	17	19	21	23	26	28	30
	외선	0.36	0.59	0.43	1.20	2.89	1.78	1.55	3.48	2.21	15	17	18	20	22	23	25	28	32	37	41	46	50	54	21	24	27	30	33	35	38
교대(2)	내선	0.52	0.67	0.57	1.55	3.02	2.43	2.07	3.69	3.00	21	23	26	29	31	34	36	29	34	38	43	48	52	57	25	29	33	37	41	44	48
	외선	0.52	0.78	0.68	1.55	3.47	2.88	2.07	4.25	3.56	21	23	26	29	31	34	36	32	37	43	48	53	59	64	28	33	37	42	46	51	55
서 초	내선	0.09	0.12	0.10	0.26	0.71	0.45	0.35	0.84	0.55	7	8	8	9	9	9	10	10	10	11	12	13	14	15	8	9	9	10	11	11	12
	외선	0.09	0.14	0.11	0.26	0.82	0.48	0.35	0.96	0.58	7	8	8	9	9	9	10	10	11	12	13	14	15	16	8	9	10	10	11	12	12
방 배	내선	0.22	0.28	0.19	0.19	0.45	0.37	0.41	0.73	0.56	8	8	9	9	9	10	10	9	10	11	11	12	13	14	8	9	10	10	11	11	12
	외선	0.22	0.34	0.21	0.19	0.54	0.42	0.41	0.89	0.63	8	8	9	9	9	10	10	10	11	12	13	14	14	15	9	9	10	11	11	12	13
사당(2)	내선	1.35	1.79	1.08	1.15	1.88	1.18	2.50	3.67	2.26	23	26	29	32	36	39	42	29	33	38	43	48	52	57	22	24	27	30	33	36	39
	외선	1.35	2.27	1.14	1.15	2.37	1.25	2.50	4.64	2.39	23	26	29	32	36	39	42	34	40	46	51	57	63	69	22	25	28	31	34	38	41
낙성대	내선	0.61	0.76	0.34	0.15	0.34	0.25	0.76	1.10	0.58	9	10	11	12	12	13	14	13	14	15	17	18	19	20	8	9	10	10	11	12	12
	외선	0.61	0.87	0.38	0.15	0.40	0.27	0.76	1.27	0.65	9	10	11	12	12	13	14	14	15	16	18	19	21	22	9	9	10	11	12	12	13
서울대	내선	0.87	1.03	0.53	0.25	0.53	0.48	1.12	1.56	1.00	13	14	15	17	18	19	20	15	17	18	20	22	24	25	12	14	15	16	17	18	19
	외선	0.92	1.25	0.56	0.27	0.64	0.50	1.19	1.89	1.06	13	15	16	17	19	20	21	16	18	21	23	25	27	29	13	14	15	16	17	19	20
봉 천	내선	0.58	0.69	0.35	0.11	0.18	0.17	0.69	0.87	0.52	9	10	10	11	12	13	13	10	11	12	12	13	14	15	8	9	9	10	10	11	12
	외선	0.62	0.83	0.33	0.11	0.22	0.16	0.73	1.05	0.49	9	10	11	11	12	13	14	13	14	15	16	17	18	20	8	9	9	10	10	11	11
신 림	내선	1.54	2.02	0.90	0.27	0.49	0.37	1.81	2.51	1.27	16	18	20	22	24	26	28	23	26	29	32	36	39	42	14	15	16	18	19	21	22
	외선	1.83	2.23	0.95	0.32	0.54	0.39	2.15	2.76	1.35	21	24	27	29	32	35	38	24	28	31	35	38	42	45	14	15	17	18	20	21	23
신대방	내선	0.48	0.63	0.32	0.10	0.24	0.15	0.57	0.87	0.47	8	9	10	10	11	11	12	10	11	12	12	13	14	15	8	8	9	9	10	10	11
	외선	0.57	0.69	0.34	0.12	0.27	0.16	0.68	0.96	0.50	9	10	10	11	12	12	13	10	11	12	13	14	15	16	8	9	9	10	10	11	11
구로공단	내선	0.83	0.99	0.56	0.41	1.50	0.70	1.24	2.49	1.26	13	15	16	18	19	20	22	23	26	29	32	36	39	42	14	15	16	18	19	21	22
	외선	0.98	1.20	0.56	0.49	1.82	0.70	1.47	3.02	1.26	14	16	18	19	21	23	24	25	29	33	37	41	45	49	14	15	16	18	19	21	22
대 림	내선	1.27	1.66	0.92	0.34	1.02	0.52	1.61	2.68	1.44	15	17	19	20	22	24	26	24	27	31	34	37	41	44	14	16	18	19	21	22	24
	외선	1.61	1.92	0.87	0.43	1.18	0.50	2.04	3.10	1.37	20	23	26	28	31	33	36	26	30	34	38	42	46	50	14	16	17	19	20	22	23
신도림	내선	4.91	4.45	1.94	1.25	2.38	1.24	6.16	6.83	3.19	42	49	57	65	73	81	89	45	54	62	71	80	89	97	26	30	34	39	43	47	51
	외선	3.93	4.45	2.35	1.00	2.38	1.51	4.93	6.83	3.86	35	42	48	54	60	67	73	45	54	62	71	80	89	97	30	35	40	45	49	54	59
문 래	내선	0.33	0.32	0.13	0.19	0.66	0.17	0.52	0.98	0.30	8	9	9	10	10	11	12	10	11	12	13	14	15	16	7	8	8	8	9	9	9
	외선	0.24	0.32	0.19	0.14	0.66	0.25	0.38	0.98	0.44	8	8	8	9	9	10	10	10	11	12	13	14	15	16	8	8	9	9	10	10	11
영등포구	내선	1.36	1.27	0.59	0.72	1.98	0.74	2.08	3.25	1.33	21	23	26	29	31	34	37	27	31	35	39	43	47	52	14	15	17	18	20	21	23
	외선	0.96	1.21	0.91	0.51	1.88	1.13	1.47	3.09	2.03	15	16	18	19	21	23	24	26	30	34	38	42	45	49	20	23	26	28	31	33	36
당 산	내선	0.88	0.85	0.39	0.34	0.74	0.26	1.23	1.60	0.65	13	15	16	17	19	20	22	15	17	19	20	22	24	26	9	9	10	11	12	12	13
	외선	0.64	0.85	0.57	0.25	0.74	0.37	0.89	1.60	0.94	10	11	12	13	13	14	15	15	17	19	20	22	24	26	10	11	12	13	14	15	16
합 정	내선	1.26	1.31	0.60	0.55	1.56	0.75	1.81	2.87	1.35	16	18	20	22	24	26	28	25	28	32	36	39	43	47	14	15	17	18	20	21	23
	외선	0.98	1.31	0.83	0.43	1.56	1.02	1.41	2.87	1.85	14	16	17	19	20	22	24	25	28	32	36	39	43	47	16	18	20	22	24	26	28
홍 대	내선	0.61	0.69	0.28	0.30	0.89	0.52	0.91	1.58	0.80	10	11	12	13	14	15	16	15	17	18	20	22	24	25	9	10	11	12	13	14	14
	외선	0.47	0.65	0.40	0.23	0.85	0.75	0.70	1.50	1.15	9	10	10	11	12	13	13	15	16	18	20	21	23	25	13	14	16	17	18	19	21
신 촌	내선	0.36	0.46	0.22	0.35	0.78	0.58	0.71	1.24	0.80	9	10	11	11	12	13	14	13	15	16	18	19	20	22	9	11	11	12	13	14	14
	외선	0.32	0.44	0.31	0.30	0.74	0.84	0.62	1.17	1.15	9	9	10	11	11	12	13	13	14	16	17	18	20	21	13	14	16	17	18	19	21
이 대	내선	0.22	0.30	0.14	0.17	0.32	0.40	0.39	0.62	0.54	8	8	8	9	9	10	10	9	9	10	11	11	12	13	8	9	9	10	11	11	12
	외선	0.19	0.30	0.18	0.15	0.32	0.52	0.34	0.62	0.70	7	8	8	9	9	9	10	9	9	10	11	11	12	13	9	10	10	11	12	13	13
아 현	내선	0.24	0.33	0.14	0.14	0.17	0.10	0.38	0.49	0.24	8	8	8	9	9	10	10	8	9	9	10	10	11	11	7	7	8	8	8	8	9
	외선	0.20	0.33	0.18	0.11	0.17	0.12	0.31	0.49	0.30	7	8	8	8	9	9	9	8	9	9	10	10	11	11	7	8	8	8	9	9	9
충정로	내선	0.25	0.33	0.17	0.40	0.99	0.35	0.66	1.32	0.52	9	9	10	11	12	12	13	14	15	17	18	20	21	23	8	9	9	10	10	11	12
	외선	0.22	0.33	0.22	0.35	0.99	0.46	0.58	1.32	0.68	8	9	10	10	11	12	12	14	15	17	18	20	21	23	9	10	10	11	12	12	13

그림 3 . 시간대별 소요 승하차승객수에 기반한 승하차소요시분 추정

4. 동적 승하차시분에 따른 운행패턴의 변화

열차운행계획에 따라 실제 운행 중에는 예측하지 못한 정차시분의 변화와 이에 따른 열차간 시격이 계획과 달리 운행되게 되며, 지속적인 승하차수요가 발생되는 혼잡시간대에는 이러한 변화에 따라 실제 소요되는 승하차시분이 변하게 된다. [그림 3]에서 추정된 최소소요 정차시분(승하차 소요시분)에서는 선행열차와의 시격에 따라 승하차소요시분이 달리 추정되며, 본 연구에서는 이러한 추정결과가 실제 운행상황에서 어떻게 열차의 지연을 증폭시키고 후속열차들에게 확산·파급되는 지에 대한 실증실험 분석결과를 제시한다.

실증실험에서는 오전 혼잡시간대의 2호 노선 외선구간을 운행하는 33대의 열차를 대상으로 하였으며, 이들의 운행계획이 [그림 4]에 제시되어 있다. 실제 운행시 앞서 추정된 동적 승하차소요시분과 혼잡도를 적용하고, 평준화율을 달리 적용할시 운행상황이 어떻게 변하는지를 [그림 5~7]과 같은 실험결과로 제시한다.

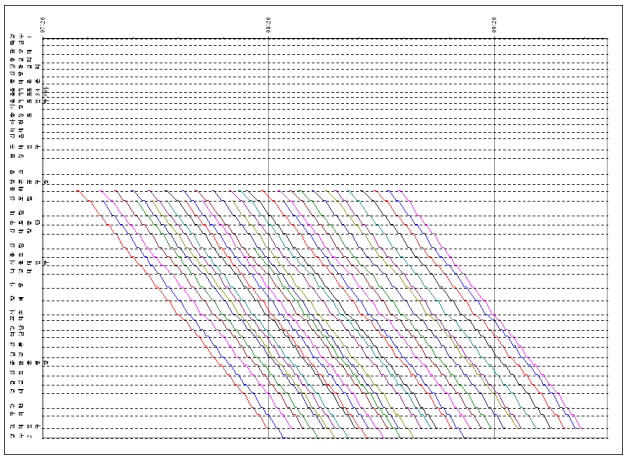

그림 4 . 운행계획다이아

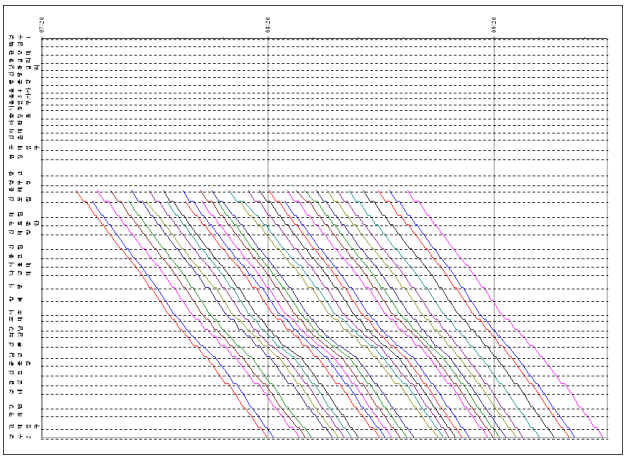

그림 5 . 혼잡평준화 110-130-150 적용다이아

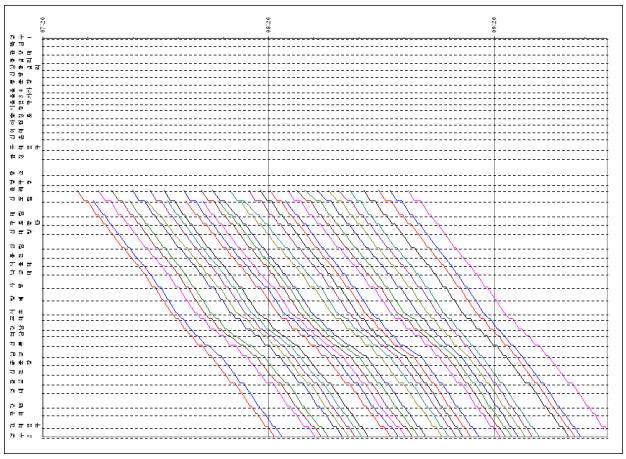

그림 6 . 혼잡평준화 150-180-200 적용다이아

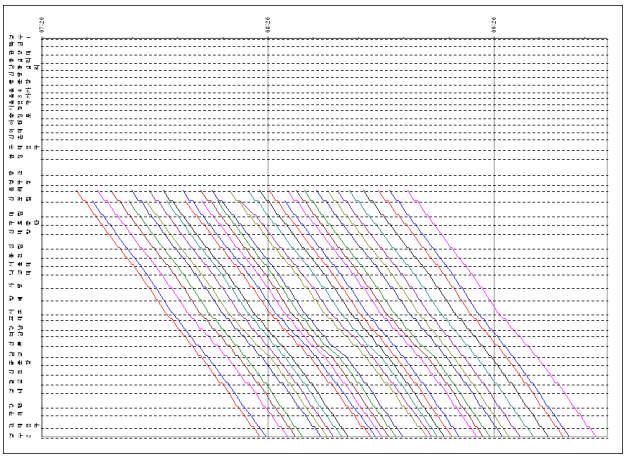

그림 7 . 혼잡 완전평준화(100%) 적용다이아

동적 승하차소요시분과 혼잡도, 그리고 평준화율을 혼잡도에 따라 150, 130, 110%를 적용한 결과가 [그림 5]와 같으며, 평준화율을 200, 180, 150%를 적용한 결과가 [그림 6]과 같다. 혼잡평준화가 불균등될 수록 시격확산과 운행지연의 발생 및 그 파급이 커짐을 시각적으로 볼 수 있다. 만약 이상적으로 승하차소요승객수를 전체 승하차출입구에 완전 균등·분산시킬 수 있다면, [그림 7]과 같은 운행결과가 얻어질 것이다.

5. 결론

대도시권 도시형 메트로 철도에서는 특정 혼잡구간에서의 만성적인 혼잡지연과 그 파급확산으로 승객서비스 수준 저하와 내부적인 운영계획의 차질 문제가 심각해지고 있다. 철도선진국에서는 많은 투자가 필요한 인프라 하드웨어의 개선/확장 보다는 소규모 투자로 큰 효과가 기대되는 운영효율성 향상 분야의 연구개발에 더 많은 투자를 늘리고 있는 추세이다.

본 연구에서는 이러한 측면에서 그동안 경험적이고 직관적인 수준에서 수행되어 온 도시형 철도운행계획의 가장 기본이 되는 이용수요에 따른 정차시분의 영향을 실제 데이터를 활용하여 실증실험 분석으로 제시하였다. 마치 생산라인의 컨베이어 조립공정과 같은 특성을 갖는 도시형 메트로 운행노선에서는 각 공정의 소요시간을 균형화시키는 것과 마찬가지로 각 역에서의 정차시분을 균형화시키는 것이 전체 지연의 발생 및 확산을 최소화할 수 방안이 될 것이다. 따라서 본 연구의 결과를 기반으로 수요을 고려한 운행계획의 수립이 필요할 것이며, 나아가 지연의 발생에 따른 파급을 최소화하기 위한 운영적 측면에서의 승객분산유도기술, 실시간 열차간격제어기술 등의 연구개발이 반드시 필요하다.

6. 참고문헌

1. 김동희, 이원순, 홍순흠(2002), “열차스케쥴 평가를 위한 다중열차주행 시뮬레이션”, 한국철도기술, 통권 33호
2. 오석문, 김형진(1999), 서울시 혼잡 지하철역의 승하차 시간 분석
3. Andre Puong, Dwell Time Model and Analysis for the MBTA Red Line
4. C Hirai and N Tomii(RTRI, 1998), A TRAIN TRAFFIC CONTROL SIMULATION WITH PASSENGERS’ FLOWING MODEL
5. Michael Pead(Aston University, 2007), The Impact of Boarding and Alighting Passengers on the Dwell Time at Railway Stations
6. N G Harris. and R J Anderson(London, 2007), An international comparison of urban rail boarding and alighting rates
7. TCRP(1999), Transit Capacity and Quality of Service Manual
8. Zhang Qi, Han Baoming, Li Dewei(Beijing, 2008), Modeling and simulation of passenger alighting and boarding movement in Beijing metro stations