

수요기반의 경부고속철도 열차운행계획 수립기법에 관한 연구

Based on the Demand, A Scheduling Method for the Seoul-Busan High Speed Rail

박진용† 장수은*
Jin-Yong Park Justin S. Chang

ABSTRACT

This paper explored an effective scheduling method for the Seoul-Busan High Speed Rail. It is important to decide train frequency influencing on scheduling method. Main factors to decide train frequency are location of station, social economic index, land use of station area and travel demand. In this paper, we focused on travel demand which is critical factor to decide train frequency. And we studied on standardized scheduling method. Simulation method is used to analyze the performance of explored method.

1. 서론

최근 고속열차(KTX)의 운영효율을 증진시키기 위하여 기존선 복선화 및 고속철도 전용구간 신설 등 다양한 속도향상방안이 추진되고 있다. 그러나 물리적인 시설확충에 비해서 운영 측면의 연구는 상대적으로 소홀한 실정이다. 이에 본 연구에서는 경부고속철도의 효율적인 열차운행계획 수립에 관한 연구를 수행한다.

현재 철도운영주체는 각 지역의 민원, 현재까지의 운행실적 등에 따라 필요할 때마다 열차 운행계획을 수립하고 있다. 본 연구에서는 정차에 가장 큰 영향을 주는 요소인 수송수요를 근거로 하여 예정된 정차역을 대상으로 표준화된 열차운행계획 기법을 연구하고자 한다.

수송수요는 역별 이용자 규모로 정의될 수 있다. 역별 이용자에 대한 분석은 시기별(시간대별, 일별, 월별, 계절별, 연간 등) 분석뿐만 아니라 시계열적 분석 즉, 역 이용자수의 증가, 감소 추세에 대한 분석과 주변지역의 토지이용에 따른 이용자수 변화 등에 대한 분석도 필요하다. 본고에서는 이러한 시계열적 변화, 장래 주변지역의 토지이용, 지자체의 민원에 의한 정차, 운영자의 경영수지 개선을 위한 정책적인 결정 등은 연구범위에서 제외한다. 즉, 현재 운행되고 있는 운영방법이 타당한가에 대한 분석을 위주로 연구를 수행하고자 한다.

아울러, 2011년 경부고속철도 2단계 개통을 고려한 분석을 추가로 실시한다.

사실 고속철도의 열차운행계획수립에 관한 연구는 몇 차례 시도된 바 있다.(김연규 외, 2004 ; 이진선 외, 2007). 그러나 기존연구는 정차역의 선정방법이나 역별 최적정차횟수 분석 등의 연구만 있었을 뿐, 열차운행계획 자체에 관한 연구는 거의 찾아볼 수가 없다. 이에 본 연구는 시뮬레이션 기법을 바탕으로 관련연구를 수행하고자 한다. 다음 장에서는 경부선 KTX의 현황에 대해 분석하고 이어서 열차운행계획을 구축한 후, 모의실험을 통해 결과를 도출하고자 한다.

† 정회원 서울대학교 환경대학원 석사과정
E-mail : realdragon70@naver.com
TEL : 032-432-0001 FAX : 02-880-1444
* 정회원 서울대학교 환경대학원 석사과정

2. 본론

2.1 경부선 KTX 현황분석

2.1.1 경부선 KTX 시종착 유형

KTX는 매일 정기적으로 운행하는 열차가 106회(2008년 5월 기준)이다. 주말에 추가로 운행하는 열차는 44회이다. 본 절에서는 <도표 1>과 같이 매일 운행하는 106회에 대해서 분석하였다.

KTX의 시종착 유형은 8가지이다. 하행 기준 운행횟수는 서울-부산 구간이 1일 32회로 가장 많으며, 행신-부산 구간까지 포함한다면 34회가 되어 전체의 64%에 달한다.

KTX 전체 운행열차의 평균적인 운행거리는 321.2km이다. 가장 긴 구간은 행신-부산구간으로서 423.2km이며, 서울-대전구간의 159.8km가 가장 짧은 구간이다. 평균정차역수는 운행거리에 의해서 크게 영향을 받는데 평균적으로 5.3개/열차이며, 서울-대전 구간은 4개역이고 행신-부산 구간의 경우 6.8개역에 달한다. 평균 역간거리는 73km 수준이다.

<도표 1> KTX 시종착 유형별 운행 현황

시발역	종착역	운행횟수	운행거리 (km)	평균 정차횟수	평균 역간거리 (km)
서울	부산	32	408.5	6.0	82.2
부산	서울	32	408.5	6.0	82.2
서울	동대구	14	293.1	4.5	83.7
동대구	서울	14	293.1	4.5	83.7
행신	부산	5	423.2	6.8	73.0
부산	행신	5	423.2	6.8	73.0
서울	대전	2	159.8	4.0	53.3
대전	서울	2	159.8	4.0	53.3
전체 평균			321.2	5.3	73.0

2.1.2 경부선 KTX 열차별 운행 현황

KTX의 시종착 유형을 보다 세분화하여 열차별로 보면, 서울-부산구간의 경우 32대의 열차가 운행되고 있는데 이 중 4대의 열차가 시종착역을 포함하여 4개역을 정차하고 있으며, 평균역간거리는 102.2km이다. 서울-부산 구간의 모든 역에 정차하는 열차는 6대로서 역간거리는 58.4km수준이다. 부산-서울 구간도 이와 유사한 패턴으로 운행되고 있다.

서울-동대구 구간의 경우 14대의 운행열차 중 절반인 7대의 열차가 구간 전역을 정차하는 패턴을 보이고 있으며, 서울-대전 구간은 상하행 모든 열차가 4개역에 정차하고 있다. 경부선의 역간평균거리의 최소값은 서울-대전 구간을 운행하는 열차의 53.3km수준이다.

2.1.3 경부선 KTX 정차역별 일평균 정차횟수

경부선 KTX의 정차역별 일평균 정차횟수를 보면 고속철도 정차대상역 9개역에 1일 정차하는 빈도는 총 592회이며, 이중에서 서울역과 대전역이 106회로 가장 많고, 동대구역이 102회, 부산역, 광명역, 천안아산역, 구포역, 밀양역, 행신역의 순서이다.

<도표 2> KTX 정차역별 일평균 정차횟수

역명	정차횟수	역명	정차횟수
행신	10	동대구	102
서울	106	밀양	32
광명	60	구포	42
천안아산	60	부산	74
대전	106	합계	592

주 : 정차횟수에는 시발역, 종착역 포함

2.1.4 경부선 KTX 수송수요

<도표 3>은 경부선 KTX의 수송수요를 정리한 것으로 KTDB의 월별 지역간 철도여객 수송실적 2008년 5월 자료를 이용한 것이다. 서울역의 경우, 출발량과 도착량의 합이 58,710인으로서 다른 역들에 비해서 매우 높은 수준을 보이고 있다. 그 다음으로 동대구역, 부산역, 대전역 순인 것으로 분석되었다. 반면 행신역의 경우 830인으로서 전체에서 차지하는 비중이 가장 낮은 수준으로 분석되었다.

<도표 3> 경부선 KTX 수송수요

(단위 : 인)

O \ D	행신	서울	광명	천안아산	대전	동대구	밀양	구포	부산	합계
행신	-	47	1	13	96	153	1	18	147	476
서울	8	-	42	1,712	5,446	9,618	1,081	1,910	9,183	29,000
광명	1	55	-	267	1,135	2,281	221	593	1,838	6,391
천안아산	14	1,783	306	-	605	776	65	211	813	4,573
대전	73	5,820	1,196	601	-	1,730	154	585	2,008	12,167
동대구	122	9,752	2,248	743	1,641	-	46	666	2,608	17,826
밀양	3	1,171	255	70	158	45	-	50	193	1,945
구포	16	1,932	543	215	578	588	42	-	11	3,925
부산	117	9,150	1,805	805	1,889	2,399	146	5	-	16,316
합계	354	29,710	6,396	4,426	11,548	17,590	1,756	4,038	16,801	92,619

2.2 열차운행계획 구축

2.2.1 최적정차횟수 산정

최적정차횟수는 수요에 비례하는 것으로 가정한다. 식(1)에 따라 현재 운행되고 있는 총 정차횟수를 수요에 따라 배분하였다. <도표 4>에서 서울, 동대구, 부산의 경우에는 상대적으로 수요에 비해 적게 정차한다는 것을 알 수 있다. 반면, 나머지 역의 경우에는 상대적으로 많이 정차하는 것으로 분석되었다.

$$A_i = \sum_j B_j \times \frac{d_i}{\sum_j d_j} \quad \forall j \quad (1)$$

A_i : i 역에서의 최적정차횟수

B_j : j 역에서의 현재정차횟수

d_i : i 역에서의 평일 총 수요

<도표 4> 수요에 따른 KTX 최적정차횟수

	행신	서울	광명	천안아산	대전	동대구	밀양	구포	부산	합계
총 수요(인)	830	58,710	12,787	8,999	23,715	35,416	3,701	7,963	33,117	185,238
평일 총 수요(인)	623	44,033	9,590	6,749	17,786	26,562	2,776	5,972	24,838	138,929
현재정차횟수(A)	10	106	60	60	106	102	32	42	74	592
최적정차횟수(B)	3	188	41	29	76	113	12	25	106	592
배수(A/B)	3.77	0.56	1.47	2.09	1.40	0.90	2.71	1.65	0.70	

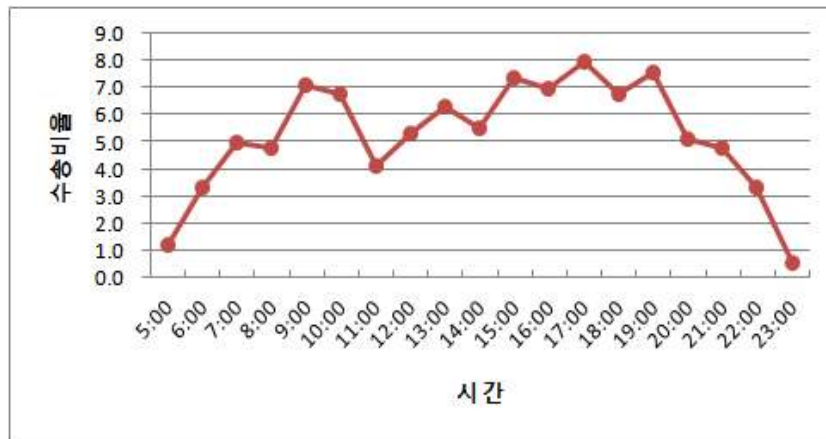
주 : 평일 총수요 = 총 수요 × 평일지수(0.75)
 평일지수는 오석문, 김동희(2001)의 연구결과 적용

2.2.2 시각표 구축

(1) 제약조건

본 연구에서는 기존에 운행되던 열차수와 열차 당 정차횟수를 기존과 동일하게 유지하면서 각 역별 정차횟수와 열차의 배차간격만을 조정하여 시각표를 만들었다. 이는 기존의 총 서비스 수준을 변화시키지 않는 조건하에서 열차운행계획만 조정하여 최적의 결과를 산출하기 위함이다. 이를 위하여 5 가지 제약조건을 설정한다.

- ① 열차 수는 기존의 평일운행횟수와 동등하게 53대로 고정한다.
- ② 대전역과 동대구역은 모든 열차가 정차한다.
- ③ 속도경쟁력을 유지하기 위해 총 열차 당 중간정차횟수는 기존과 동등하게 편성한다.
- ④ 맨 마지막 2대의 열차는 서울-부산행, 서울-동대구행으로서 기존과 같이 모든 역에 정차하도록 설정한다.
- ⑤ 열차출발간격(Headway)은 첨두.비첨두 시간을 고려하여 <그림 1>의 시간대별 비율을 적용한다.



<그림 1> 시간대별 수송인원 비율

(2) 시각표 구축 과정

시각표는 3단계 과정으로 구축한다.

첫째, 열차운행 종류를 2가지로 단순화하고 총 중간 정차횟수를 구한다. <도표 1>에서 확인할 수 있듯이, 열차운행 종류는 4가지(행신-부산, 서울-부산, 서울-대전, 서울-동대구)이다. 하지만 행신-부산 구간과 서울-대전 구간은 열차운행횟수도 편도기준으로 각각 5대, 2대로서 많지가 않다. 또한 행신역 같은 경우에는 수요도 전체의 1%도 안될 만큼 적기 때문에 행신에서 출발하는 수요는 분석에서 제외하였고, 행신-부산구간의 열차는 서울-부산구간으로 가정하였다. 그리고 서울-대전 구간은 서울-동대구 구간으로 가정하여 총 2가지(서울-부산, 서울-동대구)로 열차운행 유형을 나누었다.

<도표 5>는 열차운행 종류에 따라 정차횟수를 구한 것이다. 여기서 평균 중간정차횟수는 <도표 2>에서 구한 평균정차횟수에서 시종착역과 대전역, 동대구역을 제외한 값이다. 예를 들면, 시각표 생성 시 서울-동대구 구간의 열차는 16대로 편성되며 열차 당 평균 1.5개의 역에 정차하고 총 24번 정차하는 것이다.

<도표 5> 유형별 중간정차횟수 산정

유형	열차 수(대)	평균 중간정차횟수	총 중간정차횟수
서울-동대구	16	1.5	24
서울-부산	37	2	74
합계	53	-	98

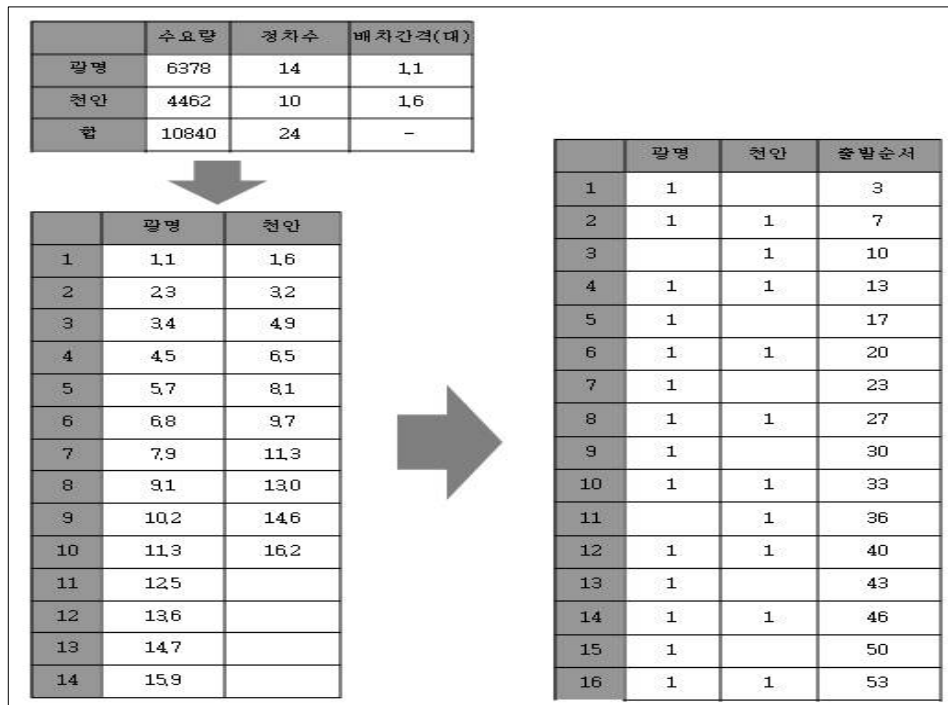
둘째, 서울-동대구 구간의 시각표를 구축한다. 서울-동대구 구간열차에 대해 서울-부산구간열차보다 우선적으로 <그림 2>와 같이 시각표를 구축한다.

우선 서울-동대구 구간의 중간정차역인 광명역과 천안아산역의 수요에 비례해서 정차횟수를 산정한다. 이때 배차간격은 식(3)에 의해 계산된다.

$$\text{배차간격} = \frac{\text{서울-동대구구간 열차수}}{\text{해당역의 정차횟수}} \quad (3)$$

다음으로 역별 배차간격을 이용하여 정차횟수만큼 증가시켜 정차순서를 정한다.

마지막으로 정차순서를 이용하여 열차별 정차역을 할당한다. <도표 5>에서 서울-동대구 구간은 중간정차횟수가 평균 1.5개이므로 1개, 2개 순으로 할당한다. 출발순서는 열차 출발 번호로서 서울-동대구 구간 열차를 총 열차수(53대)를 기준으로 균등하게 배정한다.



<그림 2> 시각표 구축 과정

셋째, 서울-부산 구간의 시각표를 구축한다. 서울-부산 구간의 열차는 앞서 배정한 서울-동대구 구간의 정차횟수를 고려하여 배차간격을 산출한다. 역별 총 정차횟수는 수요량에 비례해서 98개의 총 정차횟수를 역별로 할당한 것이다. 그리고 정차횟수는 서울-동대구 구간에 이미 할당한 정차횟수를 제외하고 남은 수이다. 예를 들면, 광명역은 총 37번 정차하는데 서울-동대구구간 열차가 14번 정차하도록

할당되었으니 서울-부산구간 열차는 23번 정차하도록 할당한다는 의미이다.

서울-동대구 구간과 같이 배차간격을 이용하여 정차순서를 정하고 순서대로 열차별 정차역을 할당한다. 출발순서 즉, 열차 출발 번호는 서울-동대구 구간 열차의 순서를 기준으로 각 중간마다 삽입한다.

<도표 6> 중간역에 대한 배차간격 산출

역명	수요(인)	총 정차횟수(대)	정차횟수(대)	배차간격(대)
광명	6378	37	23	1.6
천안	4462	26	16	2.3
밀양	1811	11	11	3.5
구포	4044	24	24	1.6
합계	16695	98	74	-

2.3 모의실험

2.3.1 모형 가정사항

모의실험을 수행하기 위하여 3가지의 사항을 가정하였다.

첫째, 본 연구에서는 경부고속철도 하행만 분석한다. 앞서 언급했듯이, 상.하행의 KTX 열차수요가 거의 같고 현재열차운행 방식도 상.하행이 거의 같기 때문에 하행만 고려하여도 큰 무리가 없을 것으로 보인다.

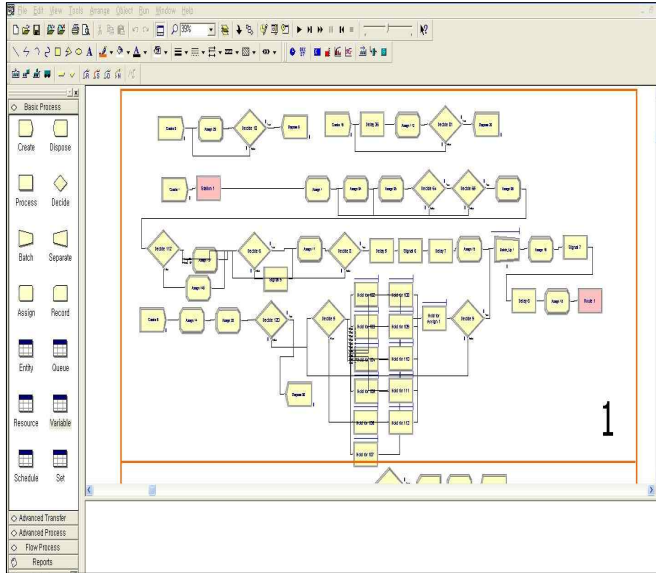
둘째, 평가지표로서 좌석점유율과 수요불만족량을 이용한다. 좌석점유율은 식(2)와 같이 승객이 점유한 좌석km의 총합을 투입된 총 차량km에 좌석수를 곱한 것으로 나누었다. 수요 불만족량은 최종적으로 열차를 탑승하지 못한 승객들의 총인원수이다.

$$\text{좌석점유율} = \frac{\text{총좌석km}}{\text{총차량km} \times \text{좌석수}} \quad (2)$$

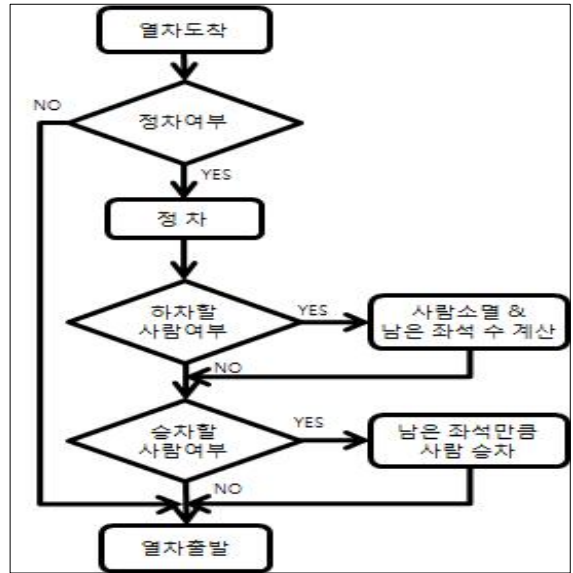
셋째, KTX가 중간역에 정차했을 경우, 3분이 추가로 소요된다고 가정하였다. 본 연구에서 KTX의 가속력은 고려하지 않았으며, 전 구간에서 같은 속도로 이동하는 것으로 가정하였다.

2.3.2 모형 구축

본 연구에서 모형 구축은 Arena 시뮬레이션을 바탕으로 하였다. <그림 3>은 실제 프로그램의 화면이다. KTX 열차가 역에 도착하여 승객이 승하차하는 과정은 <그림 4>와 같다.



<그림 3> 모형 구축 화면



<그림 4> 승하차 흐름도

2.3.3 모형 입력자료

모형의 입력자료는 역별 승하차수요와 역간 거리이다.

역별 승하차 수요는 <도표 7>과 같다. 앞서 언급하였듯이 평일을 기준으로 하행만 고려하여 입력자료를 구축하였다. 역간 거리는 <도표 8>과 같이 시간으로 입력하였다. 이때 가속도를 고려하지 않았기 때문에 기존 시각표에서 역간 이동시간을 평균한 값을 적용하였다.

<도표 7> 역별 승하차 수요표

<단위: 인>

<도표 8> 역간 거리표

<단위: 분>

D \ O	서울	광명	천안	대전	동대구	밀양	구포	부산
서울	-	32	1,284	4,085	7,214	811	1,433	6,887
광명		-	200	851	1,711	166	445	1,379
천안			-	454	582	49	158	610
대전				-	1,298	116	439	1,506
동대구					-	35	500	1,956
밀양						-	38	145
구포							-	8
부산								-

역명	시간
서울	-
광명	12
천안	19
대전	20
대구	45
밀양	28
구포	22
부산	10

2.3.4 시나리오 설정

시나리오는 기존에 운영되고 있는 시각표를 그대로 적용하였을 때와 본 연구에서 제안하고 있는 시각표를 적용하였을 때의 2가지로 설정하였다.

2.3.5 결과 분석

<도표 9>에서 볼 수 있듯이 앞서 설명한 두 시나리오에 대한 모의실험 결과, 2가지 모두 50%가량의 좌석점유율을 보였고 모든 수요를 만족시켰다. 하지만 수요에 대한 민감도 분석 결과, 개선 전에는 50%증가되었을 때부터 승차하지 못한 승객 수가 늘어나기 시작했다. 반면, 개선 후에는 70%증가되었을 때부터 늘어나기 시작하였다. 이는 기존의 열차운행계획보다 제안된 열차운행계획이 보다 효율적임을 보여주는 예이다.

승차하지 못한 승객이 발생함에도 불구하고 좌석점유율은 100%가 되지 않는다. 그 이유를 예를 들어 설명하면, 서울-부산 구간 열차에서 어떤 승객이 서울에서 천안아산까지만 탑승했을 때, 대전까지 아무도 그 자리에 승차하지 않는 경우가 발생할 수 있다.

<도표 10>은 경부선 KTX 2단계 개통 후 본 연구에서 제안하는 열차운행계획 기법을 적용하여 모의 실험한 결과이다. 그 결과, 정차역이 2개 늘어났고 총 수요가 약 37% 늘어났음에도 불구하고 기존 열차용량으로도 충분히 수용할 수 있는 결과를 얻을 수 있었다. 수요에 대한 민감도 분석 결과, 20%의 수요증가까지도 충분히 처리가능한 것으로 분석되었다.

<도표 9> 수요 증가율에 따른 모의실험 결과

수요 증가율 (%)	개선 전(현재)		개선 후	
	좌석점유율 (%)	수요 불만족량 (인)	좌석점유율 (%)	수요 불만족량 (인)
0	48.26	0	49.53	0
10	50.21	0	54.46	0
20	55.20	0	59.44	0
30	65.26	0	64.38	0
40	70.30	0	69.35	0
50	75.24	44	74.30	0
60	80.01	180	80.33	0
70	84.42	495	85.00	218
80	87.32	1,548	87.36	1,539
90	89.06	3,174	89.48	2,966

<도표 10> KTX 2단계 개통 시, 모의실험결과

수요증가율 (%)	좌석점유율 (%)	수요 불만족량(인)
0	60.05	0
10	66.56	0
20	72.63	0
30	78.07	457
40	80.81	3,114
50	82.15	6,945

3. 결론

현재 철도운영주체는 각 지역의 민원, 현재까지의 운행실적 등을 근거로 하여 필요할 때마다 열차 운행계획을 수립하고 있다. 현행 KTX 열차시각표의 역별 정차횟수는 전반적으로는 수요를 따르는 경향을 보였지만 세부적으로는 다소 격차를 보였다. 본 연구에서는 이를 비효율적인 부분이라고 판단하여 정차에 가장 큰 영향을 주는 요소인 수송수요를 근거로 열차운행계획 기법을 연구하고 이를 모의실험을 통해 검증하였다.

본 연구의 장점은 수송수요를 기준으로 정형화된 열차운행계획 수립방안을 제안하였다는 점이다.

그러나 본 연구에서는 역별 정차횟수에 따라 수요가 변하지 않는다고 가정하고 분석한 한계가 있다. 또한, 완행열차, 특급열차 등의 열차 운행계획을 고려하지 않고 시각표를 구축하였다. 향후 연구에서는 이러한 다양한 요소를 고려한 열차운행계획 기법에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한철도, “철도 정책의 진단과 과제,” 한국철도학회논문집, 90권, 1호, pp.10-15, 2009.(논문지의 경우)
2. Tae Wuk Choi and Sang Chul Yoo, "Electrical and mechanical properties of ceramics," J. Mater. Sci., Vol.15, No.1, pp.10-15, 2001.(논문지의 경우)
3. T. W. Choi and S. C. Yoo, "Electrical ceramics," SID'95 digest paper, pp.10-15, 1995.(외국학술대회의 경우)
4. T. W. Choi and S. C. Yoo, "Electrical ceramics," Proc. 2002 Summer Conf. KIEEME, pp.10-15, 2002.(국

내학술대회의 경우)

1. 한국철도기술연구원, “기존선 전철화에 따른 중장거리 전기차량 운행방안 연구,” 2000.
2. 한국철도기술연구원, “분배모형에 의한 철도 수요예측에서 영향인자에 대한 연구,” 2000.
3. 오석문, 김동희, “철도수요의 시계열 분해 방법에 대한 연구”, 한국철도학회논문집, pp. 111-116, 2001.
4. 한국철도기술연구원, “경부고속철도 연계교통체계 구축 기본계획 수립연구,” 2003.
5. 한국철도기술연구원, “철도영업정책 효율성 향상방안 연구,” 2004.
6. 문대섭, 정병현, “철도수송수요를 고려한 정차역 선정과 열차운행방안”, 한국철도학회논문집, pp. 80-87, 2004.
7. 이진선 외3인, “지역간 철도역의 열차운행체계 연구”, 대한교통학회논문집, v.25 no.5, pp.111-122, 2007.
8. 김경태, 이진선, “다항로짓모형을 이용한 지역간 철도통행 연구”, 대한교통학회논문집, v.25 no.1, pp.109-119, 2007.
9. 엄진기, 허태영, “수송실적자료를 이용한 철도교통 수요변화 추정 연구”, 한국철도학회논문집, v.12 no.3, pp.420-426, 2009.