

# 수요를 고려한 열차 스케줄 조정방안 연구

## A Study on the Adjustment of Railway Schedule

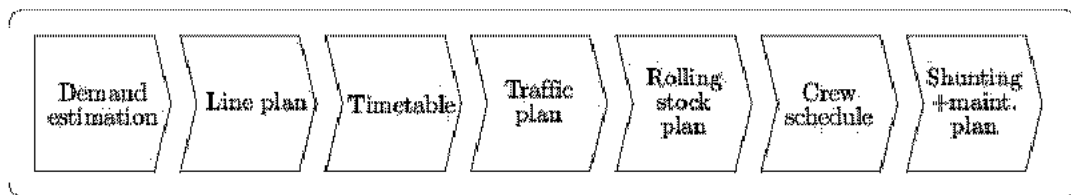
박범환\*, 홍순흠\*\*, 김동희\*, 김경태\*

### ABSTRACT

Railway schedule is periodically modified so that it could yield more profit by means of adjusting the schedule to demand. Most of related works are applicable under the given demand, but did not deal with dynamic relation between demand and schedule. To our knowledge, the methodology considering the relation is only the profitability evaluation model developed by SNCF. Our study suggests how to adjust the schedule to demand and therefore obtain more benefits using the profitability evaluation model.

### 1. 서론

일반적으로 열차 스케줄의 작성은 [그림1]과 같은 과정을 거친다. 먼저 수요를 추정하고 그 수요에 기반하여 노선 계획을 수행한다. 여기서 노선 계획(line planning)이란 OD간 수요(OD demand matrix)로부터 노선별 운행 횟수를 결정하는 계획을 말한다. 이러한 노선 계획이 결정되면, 구체적인 열차 시간표(timetable)를 작성한다. '열차 스케줄'은 노선 계획과 시간표 작성 모두를 포괄하는 의미한다.



[그림 1] 열차 계획의 단계[5]

일반적으로 노선 계획에서는 열차 수요를 만족하기 위한 레그(leg)별 최소 운행회수를 구한 후 그것을 다시 최소 비용 혹은 승객 편의성을 고려하여 노선별 운행횟수를 정한다.[4] 이러한 노선 계획이 작성되면 수요와는 무관하게 기술적인 제약들과 고객의 편의성(환승승객의 대기시간)을 고

\* 한국철도기술연구원 선임연구원

\*\* 한국철도기술연구원 책임연구원

러하여 열차 시간표를 작성하게 된다. 하지만, 이와 같은 절차를 통해 구한 열차 스케줄은 전체 수요량과 그 수요의 열차별 배분에 직접적으로 영향을 준다는 점에서 열차 스케줄과 수요를 분리하여 처리해서는 열차 스케줄의 정확한 수익을 계산할 수 없다는 단점이 있다. 또한 노선계획에 관련된 대부분의 연구들은 연속적인 수요를 시간대의 수요로 이산화 함으로써, 실제 열차 수요의 배분상향을 제대로 반영하고 있지 못한 단점을 가지고 있다. 이러한 수요와 열차 스케줄의 직접적인 연관관계를 현실적으로 고려한 모형은 지금까지 알려진 바로는 RailPlus의 수익성 평가 모형뿐이다.

2장에서는 수요와 열차 스케줄의 관계를 직접 다룰 수 있는 수익성 평가 모형에 대해 간단히 알아보고, 이것의 현실적인 이용을 위해 필요한 체계치에 대해 알아본다. 3장에서는 수익성 평가 모형을 이용해 기존의 스케줄을 어떻게 조정하는지 실제 예를 통해 알아보고자 한다.

## 2. 수익성 평가 모형

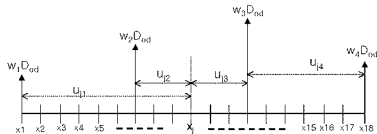
### 2.1 수익성 평가 모형

SNCF는 스케줄의 예상 수익을 계산하기 위해 확률선택모형에 기반한 열차 수익 평가 모형을 개발하였다[2][3]. 이 모형은 하부의 OD 수요량을 시간대별 출도락 선호계수( $w_j$ )에 의해 시간대별 수요로 전환하고, 이격시간, 운임, 소요시간 세 가지 인자로 구성된 효용함수(utility function)를 이용하여 각 열차별 OD 수요량을 구하였다. 특정 시간  $t$ 를 선호하는 고객이  $j$ 열차를 선택한 확률( $p_{jt}$ )은 다음과 같다.

$$p_{jt} = f(U_{jt}) / \sum_j f(U_{jt})$$

이 때,  $U_{jt} = B_1 X_{1jt} + B_2 X_{2jt} + B_3 X_{3jt}$ 로 표현되는데,  $B_1, B_2, B_3$ 는 이격시간, 운임, 소요시간에 선형 파라미터이다. 그리고,  $f(\cdot)$ 은 적용된 확률분포에 따라 선정되는 함수값이다. 즉, 확률적 효용의 확률분포를 어떤 확률분포로 가정하는냐에 따라, 선형확률모형, 프로빗모형, LOGIT모형등의 다양한 모형에 대응되는 함수가 될 수 있다[1]. 본 연구에서는 선형 확률모형을 사용하였다.

$x_j$ 위치가 열차가 투입될 경우, 이 열차의 OD수요배분을 표현하면, 다음 [그림 1]과 같다. 이 열차에 배분되는 수요는 그림에서 보듯이 각 시간대별 수요에 그 열차의 효용비율만큼 가져오게 된다.



[그림 1] 확률선택모형에 의한 열차별 OD수요 배분

위와 같이 열차별로 배분된 수요를 이용하여, 각 열차별로 용량을 할당하고, 할당된 용량을 넘는 스페일은 다시 위와 같은 확률선택모형을 이용해 스페일 재수용(spill recapture)과정을 거쳐 최종적인 열차별 용량할당을 계산하여 예상 수익을 계산하게 된다.

## 2.2 수익성 평가 모형 적용을 위한 전제

그러나 위 모형이 고객의 열차 선택 상황을 표현하는 다양한 인자들을 고려했음에도 불구하고, 확률 모형을 적용하기 위해서는 다양한 파라미터값들의 정확한 추정과 확률선택 모형에서 사용되는 확률분포의 선택이 전제되어야 한다. 수익성 평가 모형에 사용되는 파라미터와 확률분포를 세분화하면 다음과 같다.

- 시간대별 선호시간에 대한 확률( $u_i$ )
- 확률선택모형에 사용되는 이적시간, 운임, 소요시간에 대한 선형 파라미터( $B_1, B_2, B_3$ )
- 확률분포의 정확한 선택을 통한  $f(U_i)$ 값의 계산

위의 파라미터들의 정확한 추정을 위해서는 “고객이 어떤 시간대에 출도착하고자 하는지”와 “그 고객의 최종 선택”에 대한 광범한 데이터를 필요로 하며, 어떠한 확률분포를 사용할 것인지는 다양한 확률분포에 대한 실증적 연구가 선행되어야 할 것이다.

[표 1]\*은 이적시간, 운임, 소요시간에 대한 파라미터를 수정했을 때 열차별 수요가 다르게 나타남을 보여주고 있다. 예를 들어 운임에 대한 의존도를 낮추면 KTX의 수요가 상당히 증가함을 알 수 있다.

[표 1] 파라미터 변화에 따른 열차별 수요 배분의 변화

열차번호 (KTX)	실제 실적	기준	이적시간에 대한 의존 도를 높임	운임에 대한 의존 도를 낮춤	소요시간에 대한 의존 도를 높임
1	607	839	784	1012	645
2	488	831	807	925	713
3	1103	843	862	1106	635
4	760	833	842	985	705
5	1202	983	974	1172	799
6	1139	1112	1155	1279	990
7	1268	985	1059	1257	789
8	1043	864	855	956	759
9	841	345	325	393	275
10	703	320	306	353	278

[표 2]는 확률 모형에 따른 수요 배분의 효과를 나타낸 것이다. 여기서는 선형확률모형과 LOGIT모형 두 가지를 비교하였다. 대체적인 경향성은 닮아 있지만 실제 배분되는 수요는 조금씩

\* 이하 모든 실험은 일요일 경부선, 호남선, 장항선, 전라선 상 하행 335개 열차를 대상으로 한다.

차이가 난다. 어떤 모형이 더 유의미한지는 보다 많은 데이터로부터 검증을 해보아야 할 것이다.

[표 2] 선형확률모형과 LOGIT모형 비교

열차번호	실제 실적	선형확률모형	LOGIT모형
1	607	839	868
2	488	831	822
3	1103	843	865
4	760	833	833
5	1202	983	987
6	1139	1112	1079
7	1268	985	979
8	1043	864	863
9	841	345	349
10	703	320	324

### 3. 수익성 평가 모형을 이용한 스케줄 향상

본 절에서는 수익성 평가 모형에 사용되는 여러 가지 파라미터와 확률모형이 정확하다고 가정하고, 수익성 평가모형을 통해 기존 스케줄을 어떻게 향상시킬 수 있는지를 보여주고자 한다. 먼저, 수익성 평가 모형을 수행하면 다음과 같은 여러 가지 의미 있는 지표(index)들을 얻을 수 있다.

- 열차별 예상 수입/비용/수익
- 열차별 인\*km
- 열차별 OD별 스피달량
- 열차별 OD별 재수용량
- 열차별 Critical Load Factor : 레그(leg)별 load factor중 가장 큰 값
- 열차별 Dynamic Load Factor : 인\*km를 seat\*km로 나눈값
- 열차별 수입/무한용량수입 : 무한용량수입은 열차의 무한 용량을 가정한 수입을 말한다.
- 열차별 수입/무한수요수입 : 무한수요수입은 무한 수요를 가정한 수입

위 수치들은 각각 그 자체로서도 상당한 의미를 가지지만 본 연구에서는 인\*km와 수익이 동시에 증가하는 스케줄을 향상된 스케줄로 생각하고자 한다. 이것은 수송능력이라는 공공적인 측면과 수입확대라는 기업적 측면 모두를 고려한 것이다.

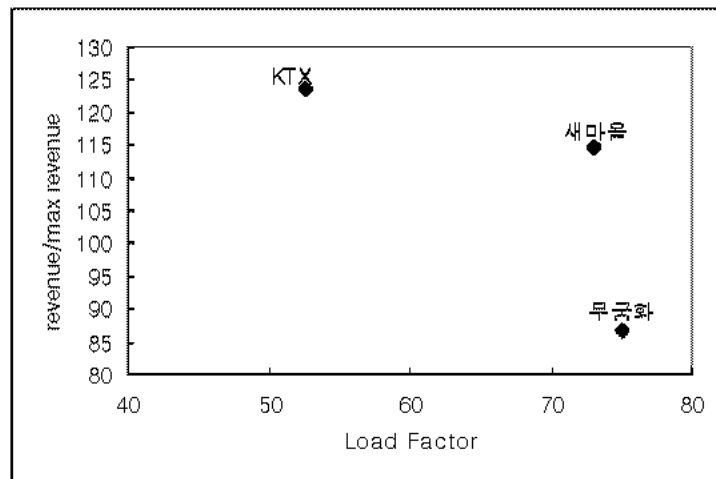
그러면, 위와 같은 각 열차별 지표를 보고 어떻게 인\*km와 수익이 동시에 증가하도록 열차 스케줄을 변경할 것인가에 대해 알아보자. [표 3]은 각 지표들간의 상관계수를 나타낸 것인데, 본 연구에서는 서로 상반되는 정도가 가장 크다고 볼 수 있는 두 개의 지표(index) '수입/무한용량수입'과 'Dynamic Load Factor'를 사용한다. 왜냐하면 어느 하나를 증가시키는 스케줄은 나머지 지표를 악화시키는 경향이 있으므로 두 지표를 동시에 고려하면 열차 수요의 흐름을 보다 정확히

파악할 수 있을 것으로 추측하기 때문이다.

[표 3] 각 지표간 상관계수

	spill	recapture	수입	인キロ	수입/무한수요 수입	Critical Load Factor	Dynamic Load Factor	수입/무한 용량수입
spill	1.000							
recapture	-0.084	1.000						
수입	-0.099	0.427	1.000					
인キロ	0.070	0.347	0.967	1.000				
수입/무한수요수입	0.130	0.136	0.639	0.725	1.000			
Critical Load Factor	0.396	0.083	0.141	0.288	0.623	1.000		
Dynamic Load Factor	0.439	-0.019	0.290	0.462	0.751	0.934	1.000	
수입/무한용량수입	-0.381	0.695	0.093	-0.077	-0.356	-0.404	-0.556	1.000

열차의 수입/무한용량수입이란 그 열차에 배분된 모든 수요를 처리했을 때의 수입과 실제 수입의 비율을 나타내는 것인데, 이것이 1보다 작다는 것은 실제 처리할 수 있는 수요에 비해 많은 수요가 돌리고 있다는 것을 나타내고, 1보다 큰 경우에는 실제 배분되는 수요보다 처리하는 수요가 더 많음을 나타낸다. 즉, 수입/무한용량수입이 크면 클수록 실제 배분되는 수요에 비해 재수용량이 상당히 많음을 나타낸다. [그림 2]는 열차종별 두 지표를 그래프로 표현한 것이다.

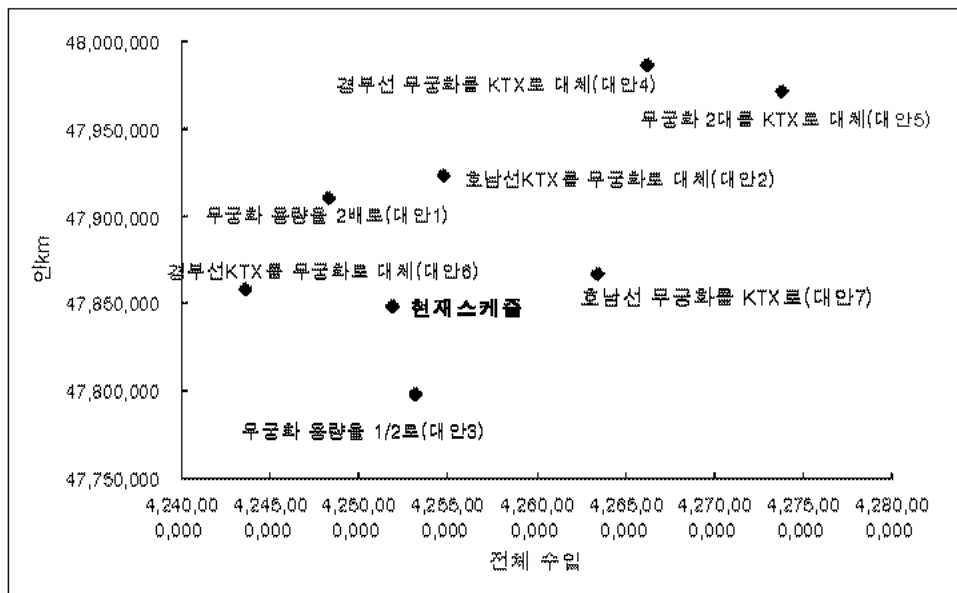


[그림 2] 열차종별 수입/무한용량수입, Dynamic Load Factor

그림에서 보듯이, KTX의 경우 load factor가 대부분 50% 근처임에도 불구하고, 수입/용량무한수입 비율이 100%를 넘는다는 것은 실제 배분되는 수요에 비해 재수용의 비중이 상당함을 알 수 있으며, 이와는 반대로 무궁화는 높은 load factor에도 불구하고, 수입/용량무한수입이 적다는 것은 수요의 상당부분이 spill되고 있음을 알 수 있다. 즉, 현재의 수익성 평가 모형에 사용되는 파라미터 값에 의하면, KTX의 상당부분의 수요가 무궁화로부터 spill되어 전이된 수요임을 알 수

있다.

본 연구는 여기서, 무궁화의 경우 load factor가 상당히 높은 열차와 KTX의 경우 수입/용량무한수입 비율이 높은 열차를 대상으로 스케줄 조정을 시도해 보았다. 가장 좋은 스케줄 조정 방법은 고려할 수 있는 모든 스케줄 조정방안에 대해 수익성 평가 모형을 수행하여 수익을 평가하는 것이지만 이것은 너무 많은 경우의 수로 인해 현실적으로 불가능하다.



[그림 3] 수익성 평가 모형을 이용한 스케줄 조정

**관찰1.** 수요가 상당히 불리는 무궁화 열차의 용량을 2배로 확대할 경우, 예상과 달리 수입은 더 줄어든다. 이것은 무궁화 열차의 용량을 늘림으로써, KTX로 전이되는 수요가 줄어 실제 수입은 오히려 줄어든 경우이다. (대안1)

**관찰2.** 관찰2와 반대로 무궁화 열차의 용량을 줄이면, KTX로 전이되는 수요가 늘어 수입은 약간 더 늘어난다. 하지만 전체 인\*km는 떨어짐을 알 수 있다. (대안3)

**관찰3.** KTX를 무궁화로 대체하는 경우에는, 수요가 적은 호남선의 경우 수입, 인\*km 모두 증가하지만, 경부선의 경우, 수입이 줄어든다. (대안2, 대안6) 이것은 호남선에 비해 수요가 상당히 많은 경부선의 경우, 수요의 상당부분이 무궁화 수요로 흡수됨으로써, 전체 수입은 감소한 것으로 보인다. 호남선의 경우에는 오히려 보다 많은 OD 서비스를 제공하는 무궁화로 대체됨으로써, KTX 요금에 의한 수입차이보다 새로운 OD서비스를 함으로써 발생하는 수입이 더 커서 전체 수입은 증가한 것으로 보인다. 이것은 수요가 많은 노선과 적은 노선의 경우 동일한 기준을 적용할 수 없음을 의미한다.

관찰4. 무궁화를 KTX로 대체하는 경우에는 인\*km와 수입이 동시에 늘어나는 효과가 있다.(대안4, 대안5, 대안7) 이것 또한 수요가 많은 경부선 노선과 그렇지 않은 호남선간에 상당한 차이가 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구의 주요 방법론인 수익성 평가 모형은 그 모형의 현실성에도 불구하고 파라미터에 대한 상당한 정도의 정확성이 보장되어야 의미를 가질 수 있다. 또한 확률선택모형에서 사용하는 확률 분포에 대한 실증적 분석도 선행되어야 의미 있는 수익성 평가 모형을 구성할 수 있음을 살펴본 것이다. 본 연구는 여러 가지 통계값이 정확하다는 가정아래, 수익성 평가 모형의 여러 지표들을 통해 현재 스케줄을 평가하고 어떻게 열차 스케줄을 조정할 수 있는지 살펴보았다.

하지만, 아직까지 절차적인(procedural) 스케줄 조정방안을 제시하지 못하였다. 수익성 평가 모형은 기본적으로 확률모형으로서 어느 하나의 열차의 추가/삭제시 전체 수입이 늘어날지 줄어들지 예측하기가 쉽지가 않고, 열차의 추가/삭제뿐 만 아니라 용량의 조정 혹은 투입할 차종의 선택 등의 여러 대안들 때문에 고려해야 할 경우의 수가 너무 많다는 단점을 가지고 있다.

#### [참고문헌]

1. 윤대식(2001), "교통수요분석-이론과모형", 박영사
2. 김동희, 홍순홍(2004), "철도수송계획의 수익성 평가체계", 춘계 한국경영과학회/대한산업공학회 공동학술대회 논문집
3. 한국철도기술연구원(2003), "차세대 철도정보화 기술개발", 연구보고서
4. M. R. Bussieck, T. Winter and U. T. Zimmermann(1997), "Discrete optimization in public rail transport", Mathematical Programming 79, pp. 415-444
5. J.-W. Goosens, S. V. Hoesel and L. Kroon(2004), "On solving multi-type railway line planning problems", technical report, Feb. 13. 2004