고객수요를 고려한 열차용량패턴에 관한 연구

Evaluation of Train Capacity Pattern Considering Customer Demands

김동희*, 김성호**, 홍순흠***

Kim, Dong-Hee Kim, Seong-Ho Hong, Sun-Heum

Abstract

In the railway system, transportation plan corresponds to a master plan for transport services. This service plan must be constructed to minimize operational cost or maximize revenue considering transportation demands and resource capacities in the railway operation company, and it includes several sub-planning activities such as train operation frequency plan, train (schedule) plan, train capacity assignment plan, and rolling stock requirement plan.

In these sub-planning processes, train can be considered as a product for providing customer services, and customer demands and operational advantages must be considered. In this paper, we present an effect estimation system for the train capacity pattern in a train schedule, and the effect of capacity pattern can be expressed as minimum spilled demand, minimum train service cost, and maximum train revenue or profit.

1. 서론

철도에서 수송계획은 수송서비스 생산을 위한 총괄계획(Master Plan)에 해당된다. 즉, 철도수송수요와 철도운영회사의 서비스제공 능력을 감안하여 운영비용 최소화 및 수익 최대화, 그리고 고객 만족도 최대화를 위한 서비스계획을 수립하는 것이다. 수송서비스에 대한 총괄계획으로서 수송계획 단계에서는 열차운행빈도(Train Operation Frequency)의 결정, 수익 및 고객만족 최대화를 위한 열차계획(열차스케쥴)의 결정, 열차용량할당(Train Capacity Assignment), 차량소요계획(Rolling Stock Requirement Plan) 등의 내용이 포함된다.

수송계획의 수립에 있어 열차는 고객서비스 제공을 위한 제품에 해당된다. 따라서 이러한 열차의 운행빈도, 스케쥴 결정, 용량할당 과정은 반드시 고객수요 및 운영수익 측면이 반영되어야만 한다. 이를 위해서는 열차계획안에 대한 수익을 추정하여 의사결정자의 보조할 수 있는 체계는 필수적이다. 본 연구에서는 열차스케쥴에서 주어진 열차의 편성용량 패턴에 따른 효과를 추정하기 위한 체계를 제시한다. 이때 고객수요는 열차가 서비스하는 모든 기종점(Origin-Destination)에 대하여 주어지며, 용량패턴의 효과는 비용의 최소화 또는 수입, 수익의 최대화로 설정될 수 있다.

2. 철도수송계획

* 한국철도기술연구원, 운영·정보시스템연구팀, 선임연구원, 공학박사, 031-460-5483, kdh777@krri.re.kr

** 인하대학교, 경영대학, 조교수, 032-860-7768, shk7768@inha.ac.kr

*** 한국철도기술연구원, 운영·정보시스템연구팀장, 공학박사, 031-460-5480, shong@krri.re.kr

철도수송계획의 핵심은 수송수요 및 자원을 고려한 최대효율의 대고객 서비스계획을 수립하는 것이다. 이러한 서비스계획에는 앞서 언급한 바와 같이 열차빈도계획, 열차스케쥴 작성, 열차용량할당, 차량소요계획 등이 있다. 대고객 상품으로서 제시되는 품목은 열차스케쥴(Train Schedule)로서 열차종별, 시종착역, 중간정차역과 그에 따른 시간스케쥴이 제시된다. 열차스케쥴 작성에 앞서 중요한 문제중 하나인 노선별 열차운행빈도(Train Operation Frequency)를 결정해야만 하며, 수요와 서비스제공능력의 함수관계로 표현될 수 있다. 특히 수요의 일별, 시간대별 특성은 운행빈도 및 출발시간을 결정함에 있어 중요한 역할을 한다.

열차스케쥴 작성 혹은 열차계획은 철도운영분야에서 가장 복잡한 문제이며, 그 결과는 철도운영회사의 직무이면서 대고객 상품이 된다. 열차스케쥴에는 고정열차스케쥴과 동적열차스케쥴이 있으나, 예약발매 방식을 채택하고 있는 대부분 철도운영사에서는 고정열차스케쥴을 사용하고 있다. 열차스케쥴의 결과물은 일반적으로 열차시각표(Train Time-Table) 혹은 열차다이아(Train Diagram)로서 표현된다(그림 1 참조).

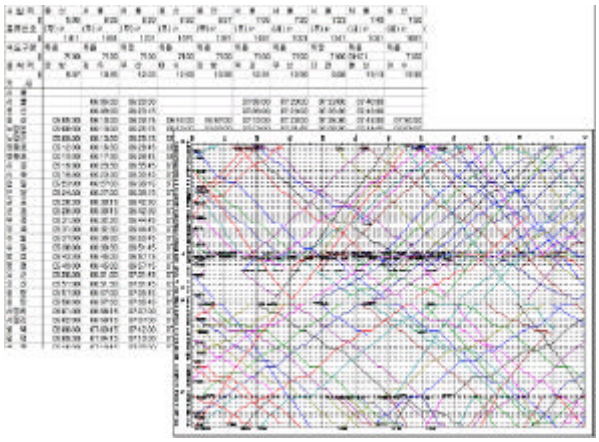

그림 1 열차시각표 및 열차다이아

열차의 출발/도착시간 및 정차역을 결정하는 것으로 수송계획이 완성되는 것은 아니며, 실제 운영가능한 수송계획 수립을 위하여 각 열차를 수행할 차량의 용량할당, 차량소요계획을 수립하여야 한다, 총괄계획으로서 수송계획 다음 단계로 객차 및 동력차 운영계획, 승무원 계획 등을 순차적으로 수립하여야만 한다. 열차용량할당은 수송계획 수립의 여러 계획기능 중에서 철도운영기관의 수익에 가장 영향이 크다고 볼 수 있다. 효율적인 용량할당을 위해서는 운영비용 및 수송량에 대한 정확한 예측이 선행되어야만 하며, 수송량(고객수요), 운임, 좌석용량이 주어지면 상실수요비용(Spill Cost)을 계산할 수 있다. 열차의 용량할당은 객차 개개의 량단위의 편성조성문제와 개념상 일부 중복될 수 있으나, 운영의 편의 및 계획의 효율성을 위하여 기조성된 편성단위로 용량할당을 수행하는 추세이다. 이러한 열차 편성용량 할당문제는 다중상품 네트워크 흐름(Multi-Commodity Network Flow)문제로 정형화되어 해결될 수 있다. 각 열차의 편성용량패턴에 따른 효과가 정확히 추정될 수 있어야 하며, 이는 본 논문에서 다루고자 하는 중점내용이다.

차량소요계획은 열차계획 수행을 위하여 편성유형(Fleet Type)별 최소소요차량에 대한 판단을 위한 기능이며, 이를 위하여 유지보수검수, 편성경로연결규칙, 차단이용율 등을 고려하여 각 편성유형별 최소소요차량 로테이션 경로를 생성하게 된다. 이 문제 역시 다중상품 네트워크흐름문제

로 정형화될 수 있으며, 주문제(Master Problem)와 서브문제(Sub Problem)로 분할하여 열생성기법(Column Generation Technique)을 적용한 해법이 대표적인 성공사례이다.

3. 열차계획의 수익평가

수송계획 수립과정에서 열차계획이나 열차용량계획의 작성(혹은 수정사항) 발생시 수익의 추정(혹은 변화)를 판단할 필요가 있다. 이를 위해서 편성용량패턴이 명시된 각 열차별로 수요에 대한 수용량 및 수익 추정을 통하여 그 효과를 평가할 수 있다(그림2 참조).

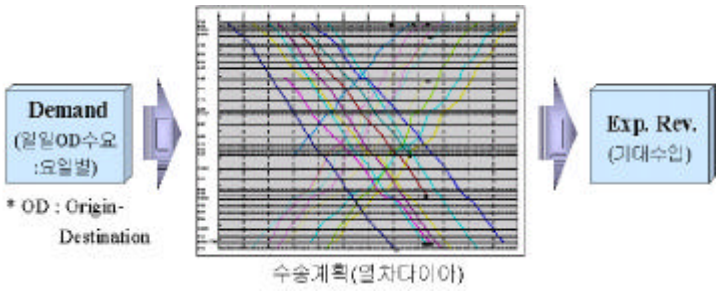

그림 2 수익 평가의 개념

수송계획 작성자가 열차계획의 수익을 평가하기 위해서는 다음과 같은 핵심기술이 필요하다 ;

- OD-Train 수요추정 : OD별 일일수요에서 OD-Train별 수요를 추정해내는 기술로서 Market Sharing Technology로 알려진 방법이 사용될 수 있다.
- Train-Leg 수요배분 : OD-Train 수요를 열차가 서비스하는 구간, 즉 Train-Leg별로 배분하는 기술로서 비선형계획법(Non-Linear Programming) 혹은 선형계획법(Linear Programming) 기법이 사용될 수 있다.
- Spill-Recapture 기술 : 각 열차의 수요와 용량을 기반으로 열차별 이탈수요(Spill) 및 재수용수요(Recapture)를 산정하는 기술이다.

OD-Train 수요추정을 위해서는 주어진 일일 총괄OD수요를 출발선호시간 및 도착선호시간분포를 이용하여 각 시간대별 고객선호에 대한 효용함수(w_t)를 계산함으로서 그림 3과 같이 일일수요분포를 생성한다. 그리고 나서 과거의 고객자료를 기반으로 다항로짓선택모형(Multi-Nomial Logit Choice Model)을 이용하여 그림 4에서와 같이 OD-Train수요배분을 수행한다.

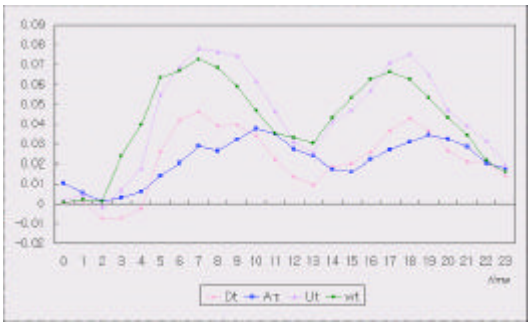

그림 3 시간대별 수요분포 생성

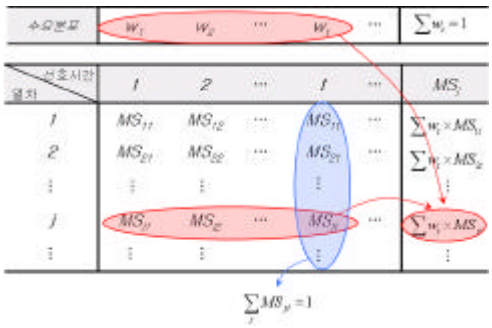

그림 4 열차별 수요분배

스필, 즉 상실수요 혹은 이탈수요는 주어진 용량보다 수요가 많이 발생함으로 인하여 놓치게 되는 수요량을 나타낸다. 스필된 기대여객수는 수요가 용량보다 큰 경우에 대한 기대값이기 때문에 항상 0보다 큰 값을 갖게 된다. 리캡쳐는 인근열차에서 스필된 여객수를 재수용할 수 있는 수용량을 나타낸다. 스필/리캡쳐 과정은 이론적으로는 더 이상 스필이 없거나, 재수용 가능하지 않을 때까지 무한히 반복되어야 한다. 그러나 통상적으로 2회까지 반복해서 사용되며, 그 이후 발생되는 스필은 무시해도 큰 무리가 없으리라 판단된다.

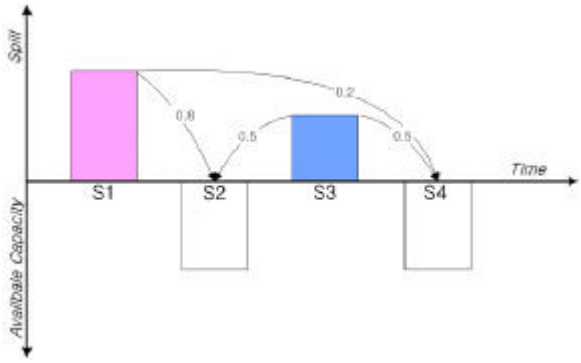

그림 5 스필추정

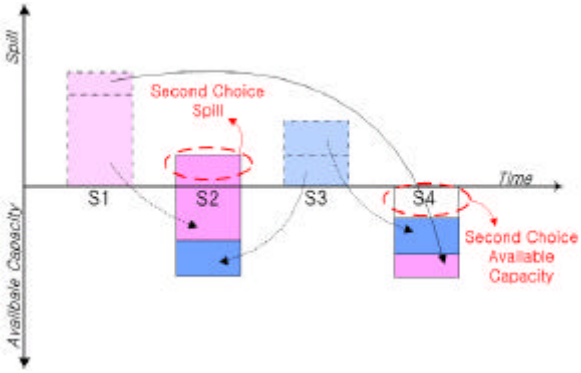

그림 6 리캡쳐 및 재스필 발생

열차별 수익(profit)은 열차의 수입(revenue)에서 열차의 비용(cost)을 차감함으로서 계산될 수 있으며, 열차의 수입은 위 일련의 과정을 통하여 계산된다. 열차비용은 크게 고정비용과 변동비용으로 대별될 수 있으며, 고정비용은 열차편성 투입비용에 해당된다. 변동비용은 다시 스케쥴관련 비용, 여객관련 비용으로 구별될 수 있으며, 스케쥴비용은 열차편성의 운행에 비례한 비용, 여객비용은 승객수에 비례한 비용으로 볼 수 있다.

Train-Leg 수요배분은 본 논문의 주제와 직결되므로 4절에서 상세히 다루기로 한다.

4. 용량패턴 효과추정

앞서 언급한 OD-Train수요추정 과정을 거치고 나면 각 열차별 운행경로(여정)에 상응하는 OD수요는 기지(known)이게 된다. 또한 열차의 운행경로상의 서비스 역간구간을 Train-Leg라 하며, 서울발 부산행 열차가 대전, 동대구역을 서비스(정차)한다고 하면 서울-대전, 대전-동대구, 동대구-부산이 여기에 해당된다. 만약 열차가 2개의 편성유닛(Train Unit)으로 서울-대전간을, 1개의 편성유닛으로 대전-동대구, 동대구-부산을 운행하고 1개 유닛은 150의 좌석용량을 가진다면, 그림 7에서와 같이 서울-대전 용량은 300, 나머지 구간은 150의 용량을 갖게 될 것이다.

OD	수요		Train-Leg		
	mean	std	서울-대전	대전-동대구	동대구-부산
서울-대전	94	14	X1		
서울-동대구	90	23	X2	X2	
서울-부산	100	28	X3	X3	X3
대전-동대구	25	4		X4	
대전-부산	58	7		X5	X5
동대구-부산	126	21			X6
합계					
Train-Leg Capacity			300	150	150
Unit 수			2	1	1

운임	Spill	Spilled Rev
11,500		
22,500		
30,600		
11,000		
19,100		
8,100		
합계		-

그림 7 Train-Leg 수요배분

그림 7에서와 같이 각 OD-Train별로 운임과 확률분포 수요함수(여기에서는 정규분포로 가정함)가 주어진다면, 각 Train-Leg에 수요를 어떻게 배분할 것인가란 문제가 발생된다. 만약 수요가 상수로 주어지고 운임이 단순거리비례로 주어진다면 간단한 방법으로 해결 가능할 것이다. 그러나 수요가 수요분포함수로 주어지고 운임이 거리체감으로 주어진다면 그리 간단한 문제가 아니게 된다. 이때 의사결정변수는 X1 X6이게 되고 의사결정변수가 정해짐에 따라 기대스필이 계산될 수 있으며, 따라서 스필로 인한 상실수입을 계산할 수가 있다. 이러한 Train-Leg 수요배분 문제의 개념적 모형은 다음과 같다.

Minimize $\sum_{OD\text{-}Train}$ 기대스필 X OD운임

Subject To

- OD-Train Leg 의 할당량은 OD-Train Leg Capacity 보다 같거나 작아야 함
  - X1+X2+X3 <= 300 and X2+X3+X4+X5 <= 150 and X3+X5+X6 <= 150
- 동일 OD-Train 에 해당되는 각 Leg 할당량은 동일하여야 함
  - 예) 서울-동대구 OD-Train 의 서울-대전 할당량 = 대전-동대구 할당량
- 의사결정변수는 비음임(non-negativity)
  - X1,X2,X3,X4,X5,X6 >= 0

그림 8 Train-Leg 수요배분 개념모형

위 기본모형에 OD별 최저 수용량 적용 등 여러 가지 추가제약들이 고려될 수 있으며, 기대스필은 다음과 같이 계산될 수 있다. 따라서 위 모형은 목적함수항이 비선형으로 비선형계획법 문제가 되며, 그림 7의 예에 대한 결과는 그림 10에서와 같다. 만약 스필 계산시 수요를 확률분포함수로 보지않고 평균치 수요를 그대로 상수로 사용한다면 목적함수항은 선형이 되므로 선형계획법 문제로 접근할 수가 있을 것이다.

$$
\begin{aligned}
SP &= E[(X-C)I_{(X>C)}] \\
&= \int_c^{\infty}(x-c)\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}e^{\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}dx \\
&= \int_{\frac{c-\mu}{\sigma}}^{\infty}(\sigma t+\mu-c)\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{\frac{1}{2}t^2}dt \\
&= \int_b^{\infty}(\sigma t-\sigma b)\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{\frac{1}{2}t^2}dt \\
&= \sigma\left\{\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_b^{\infty}te^{\frac{1}{2}t^2}dt-b\int_b^{\infty}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{\frac{1}{2}t^2}dt\right\} \\
&= \sigma\{\phi(b)-b(1-\Phi(b))\}
\end{aligned}
$$

그림 9 기대스필의 계산

OD	수요		Train-Leg			운임	Spill	Spilled Rev
	mean	std	서울-대전	대전-동대구	동대구-부산			
서울-대전	94	14	94.0			11,500	5.6	64,230
서울-동대구	90	23	55.1	55.1		22,500	35.6	800,311
서울-부산	100	28	53.4	53.4	53.4	30,600	47.1	1,442,373
대전-동대구	25	4		12.5		11,000	12.5	137,511
대전-부산	58	7		29.0	29.0	19,100	29.0	553,901
동대구-부산	126	21			67.6	8,100	58.4	473,364
합계			202.5	150	150		합계	3,471,689
Train-Leg Capacity			300	150	150			
Unit 수			2	1	1			

그림 10 Train-Leg 수요배분 결과(비선형의 경우)

그림 10의 결과에서 스필로 인한 최적의 기대상실수입은 3,471,689 이며, 이때 이러한 편성용량패턴으로 운행시 추정효과는 기대운임수입을 사용할 수가 있을 것이다. 기대운임수입은 (운임) × (각 OD별 수요배분량) 으로 5,193,750 이 된다. 즉, 예제의 열차의 경우 서울-대전은 2유닛, 나머지 구간은 1개 유닛으로 운행할 시에 5,193,750 의 수입을 기대할 수가 있을 것이다.

앞서 언급한 바와 같이 만약 OD수요를 확률분포함수로 보지 않고 평균치 상수로 처리할 경우에 어떤 차이가 있는지 살펴보기 위하여 OD수요를 정규확률분포함수로 가정하고 수요 및 변동계수(CV=표준편차/평균)에 변화를 주었다. 이 때 기대스필의 변화가 그림 11에 제시되어 있다.

Capacity	Demand	D-C	CV=0.01 (sd=5)	CV=0.05 (sd=25)	CV=0.1 (sd=50)	CV=0.2 (sd=100)
500	100	-400	0	0	0	0
500	300	-200	0	0	0	1
500	400	-100	0	0	0	8
500	500	0	2	10	20	40
500	520	20	20	23	32	51
500	550	50	50	50	54	70
500	590	90	90	90	91	100

그림 11 분산변화에 따른 기대스필

또한 동일한 변화실험 조건 하에서 정규확률분포함수를 사용한 경우와 상수처리한 경우에 대한 비교결과가 그림 12에 제시되어 있다.

capacity	demand	CV=0.01 (sd=5)	CV=0.05 (sd=25)	CV=0.1 (sd=50)	CV=0.2 (sd=100)
500	100	0	0	0	0
500	300	0	0	0	1
500	400	0	0	0	8
500	500	2	10	20	40
500	520	0	3	12	31
500	550	0	0	4	20
500	590	0	0	1	10

그림 12 확률분포함수와 상수 사용간의 차이

실험결과를 살펴보면 수요의 분산이 커질수록 확률분포함수를 사용할 경우와 상수수요를 사

용할 경우 간에 기대스필의 차이가 많이 나는 것으로 나타났으며, 평균수요와 용량 차이가 적을 경우에 기대스필이 더 차이가 나는 것을 알 수 있다. 따라서 다루여야 하는 수요의 특성을 보다 정확히 분석하여 접근방법을 신중히 결정할 필요가 있을 것이다.

5. 결론

수송계획은 철도운영회사로서는 대고객 서비스 상품이며 수행직무이게 된다. 수송계획에 포함되는 일련의 하위계획기능 들 중에 열차계획과 열차용량계획은 앞서 언급한 바와 같이 운영사의 수익과 직접적인 관계를 갖는 중요한 역할을 하게 된다. 따라서 이들 계획을 수행함에 있어 정확한 수익의 평가를 지원할 수 있는 체계 및 시스템의 중요성은 다시 언급할 필요가 없을 것이다.

본 연구에서는 수송계획 입안자의 계획업무를 지원할 수 있는 차세대 철도정보화시스템의 핵심기술로 활용될 수 있는 철도수송계획의 수익성 평가체계를 설명하고 열차편성 용량패턴 평가방안을 제시하였다. 향후연구로서 용량패턴 평가를 기반으로 한 열차편성단위의 용량결정에 관한 연구 및 향후 시스템개발을 위한 원형시스템의 개발 등을 수행할 계획이다.

참고문헌

1. 이종득, 철도공학, 노해출판사, 1994
2. 한국철도기술연구원, 「동력차 및 중장거리 동차운용스케쥴의 최적화에 관한 연구」, KRRI 연구 99-06, 1999
3. 한국철도기술연구원, 「수송계획 및 제어관리 최적화」, KRRI 연구 01-61, 2001
4. Chiang, T., H. Hau, H. Chiang, S. Ko, and C. Hsieh, "Knowledge-based System for Railway Scheduling," Data and Knowledge Engineering, Vol. 27, pp. 289-312, (1998).
5. Ciancimino, A., G. Inzerillo, S. Lucidi, and L. Palagi, "A Mathematical Programming Approach for the Solution of the Railway Yield Management Problem," Transportation Science, Vol. 33, No. 2, (1999), pp. 168-181.
6. Glover, F., R. Glover, J. Lorenzo, and C. McMillan, "The Passenger Mix Problem in the Scheduled Airlines," Interfaces, Vol. 12, No. 3, pp. 73-79, (1982)
7. Khedher, N.B, J.Kintanar, C.Queille, and W.Stripling, "Schedule Optimization at SNCF : From conception to day of departure", Interfaces, 28:1, 1998.
8. Petersen, E. R., A. J. Taylor, and C. D. Martland, "An Introduction to Computer Assisted Train Dispatch," J. Adv. Transn. Vol. 20, pp. 63-72, (1986).