

철도편익 증대를 위한 소요차량수 산정 방안

Estimation of the Optimum Number of Rail Cars to Increase the Benefit

김경태¹ · 이진선[†] · 박범환²

Kyoung-Tae Kim · Jinsun Lee · Bum-Hwan Park

Abstract Investment in railroad, it is very important to find a way to increase a benefit to make the economic efficiency more positive, but is also considering that the cost will be higher. In this paper, we suggest a optimized model for increasing the benefit of railroad business considering of stopping patterns. According to existing analytical method, the operation hour is calculated based on that scenario regarding that it stops at all major stations but it does not fit the actual operation conditions. Considering various stopping patterns can be reasonably calculated the cost for required rail cars in the planning stages, and can also affect economic efficiency in a positive way.

Keywords : Railroad Benefit, Train Performance Simulation, Scheduled Speed, Stopping Pattern, Optimization

초 록 철도투자사업의 경제성 증대를 위해서는 새로운 편익의 발굴도 중요하지만 비용 부문에서 과다하게 책정되는 부분을 개선하는 것도 매우 중요하다. 본 논문은 철도부문의 편익을 제고하기 위해 철도차량의 정차 패턴까지 고려한 최적화 모형을 이용하여 분석할 것을 제안한다. 기존의 방법은 주요 역에 모두 정차한다는 시나리오를 토대로 운행시간을 작성하였으나 이는 실제 운행 여건과는 맞지 않는다. 열차별 정차 패턴을 고려하여 소요차량수를 산정할 경우 계획 단계에서 적용되는 차량구입비를 합리적으로 산정할 수 있고 경제성 분석에도 긍정적인 영향을 주는 것으로 분석되었다.

주요어 : 철도편익, TPS, 표정속도, 정차패턴, 최적화

1. 서 론

새로운 철도차량의 개발과 영업노선 투입은 막대한 인프라 투자비에 대한 부담을 지지 않으면서 효과적으로 철도서비스를 제고할 수 있는 방안이다. 성능이 향상된 신규차량의 투입은 노선이 개량된 구간에서 뿐만 아니라 기존선 구간에서도 곡선부에서의 속도 향상 등 열차운행시간을 효과적으로 줄일 수 있는 대안이다. 신규 철도노선의 건설을 포함한 신규차량 투입 등 다양한 철도투자사업에 대한 합리적인 평가를 위해서는 철도 부문에 대한 편익 발굴이 지속적으로 이루어져야 한다.

철도 편익에 대한 연구로서 한국교통연구원[1]의 연구에서는 기존에 화폐가치화가 되지 않았던 형평성 향상, 선택 가치, 철도역 개량, 열차 개량, 폐기물 처리비용 절감, 주차비용 절감, 부담금 절감, 지역개발 효과에 대한 화폐가치화 방안을 제시하였다. 이진선 등[2]은 열차개량 편익 산정 방안을 제시하였으며, 이 편익이 경제성 분석에 미치는 영향을 제시한 바 있다. 철도투자사업의 편익 증대를 위해서는 새로운 편익의 발굴도 중요하지만 비용 부문에서도 과다하게 책정되고 있는 부분을 개선하는 것도 매우 중요하다.

본 논문에서는 철도부문의 편익을 제고하기 위해서 철도차량의 정차 패턴까지 고려한 최적화 모형을 이용하여 분석하는 방법을 제안한다. 기존 분석방법은 기존선의 주요 역에 모두 정차한다는 시나리오를 토대로 운행시간을 분석하여, 감소된 통행시간을 통해 시간가치를 추정하고, 그에 따른 차량수 산정 및 에너지 비용 등을 추론하였다. 여기에서는 분석된 O/D 수요를 만족한다는 전제 하에서 정차 패턴을 다양하게 설정하였을 때, 운행시간 변동에 따른 전체 투입되는 차량수 등이 어떻게 변화하는지를 파악하고, 경제성에 미치는 영향을 사례를 통해 분석함으로써 철도투자사업의 경제성 분석 방법의 개선 방향을 제시하였다.

2. 분석 방법론

2.1 최적화 모형의 선정

정차패턴을 결정하는 모형으로 박범환 등[3]의 연구를 들 수 있다. 이 연구는 기존의 전역 정차에 기반한 노선계획모형을 개선하여, 열차 투입비용, 미충족 수요에 대한 기회비용, 정차 패턴에 따른 승객의 총 여정시간의 가중합(weighted sum)을 최소화하며, 선로용량, 투입차량의 수, 역별 최소 정차 횟수 등 노선계획상에 고려될 수 있는 모든 제약 및 변수를 고려할 수 있는 최적화 모형을 제시하였다. 본 연구에서는 실제 운행계획이 아닌 경제성 평가의 기초자료를 작성하기 위한 노선 계획모형이므로, 수요를 만족하면서 투입되

[†]교신저자 : 우송대학교 철도경영학과
E-mail : jinsun@wsu.ac.kr

¹한국철도기술연구원

²한국철도대학

는 열차수와 승객의 여정시간을 최소화하는 노선별 열차 횟수 및 정차 패턴을 구하는 아래와 같은 보다 간단한 모형을 이용하였다.

$$\min M \sum_k P^k b^k + \sum_k \sum_{ij} \sum_{od} t_{ij} \lambda_{ijk}^{od} \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{j:ij \in A_L(k)} x_{ij}^k - \sum_{j:ji \in A_L(k)} x_{ji}^k = \begin{cases} b^k & i=s(k) \\ -b^k & i=t(k) \forall i,k \\ 0 & o/w \end{cases} \quad (2)$$

$$\sum_k \sum_{ij \in A_L(k)} x_{ij}^k \leq L_{uv}, \quad \forall uv \in A \quad (3)$$

$$\sum_{j:ij \in A_L(k)} \lambda_{ijk}^{od} - \sum_{j:ji \in A_L(k)} \lambda_{jik}^{od} = \begin{cases} D_k^{od} & i=o \\ -D_k^{od} & i=d \forall k,od \\ 0 & o/w \end{cases} \quad (4)$$

$$\sum_k D_k^{od} = D^{od} \forall od \quad (5)$$

$$\sum_{od \in A(ij)} \lambda_{jik}^{od} \leq C_k x_{ij}^k, \quad \forall k=K, \quad \forall ij \in A_L(k) \quad (6)$$

$x_{ij}^k, b^k \in \{0,1\}, \lambda_{ijk}^{od}, D_k^{od}$: 비음정수

식 (1)은 수송 수요를 만족하면서 최소의 열차를 투입함과 동시에, 그 열차에 탑승하는 승객의 여정시간(t_{ij})합을 최소화하기 위한 식이며, 여기서 M은 충분히 큰 양의 정수를 의미한다. 또한 b^k 는 k 번째 열차의 투입여부를 나타내는 이진변수이고, k 번째 열차의 정차 패턴은 식 (2)의 흐름 제약식을 통해 구성된 x_{ij}^k 변수를 통해 유도된다. 또한 열차별 OD별 승객 탑승 인원(D_k^{od})은 식 (4)의 흐름 제약식을 통해 구성되며, 각 od에 대한 열차별 탑승인원의 합은 OD수요량과 같아야 한다(식 (5)). 또한 식 (6)과 같이, 하나의 열차가 지나는 구간에 탑승하는 전체 인원의 합은 열차별 좌석 용량(C_k)을 만족해야 한다.

2.2 분석 조건

최적화 모형을 적용하기 위해서는 우선 역간 수요와 역간 통행시간이 필요하며, 이를 이용하여 열차별 정차 패턴이 도출된다. 정차패턴 도출이 필요한 이유를 설명하기 위해 호남선을 사례로 들었다. 호남선 서울~목포 구간의 중간 역은 총 70개역인데, 모든 역에 정차하는 경우와 주요 18개역에 정차하는 경우에 대해 TPS 분석을 하면, 새마을호 정차역 기준으로 분석을 했을 경우 전체 주행시간은 193.2분(중간 정차시간 제외), 전체 투입에너지는 5,535kWh이며, 70개역 정차를 가정할 경우 주행시간은 244.02분(중간정차시간 제외), 전체 투입에너지는 7,625kWh이다.

중간 정차역이 어떻게 되느냐에 따라 총 주행시간과 사용 에너지 총량은 심한 편차를 보인다. 따라서 열차가 정차할 수 있는 역이 정해져 있으면 어떠한 정차 패턴으로 몇 회의 열차를 투입해야 하는 지를 결정하는 최적화 모형을 이

용하여 소요차량수를 산정할 수 있으며, 기존의 소요차량수 산정 방식보다 정확한 차량수를 도출할 수 있다. 이로부터 경제성 분석에 미치는 영향을 파악할 수 있다. 열차별 정차 패턴을 이용하여 차량 소요량의 계산을 엄밀히 하기 위해서는 스케줄이 주어진 상태에서 Fig. 1과 같은 운용 모형(routing model)을 수행해야 한다.

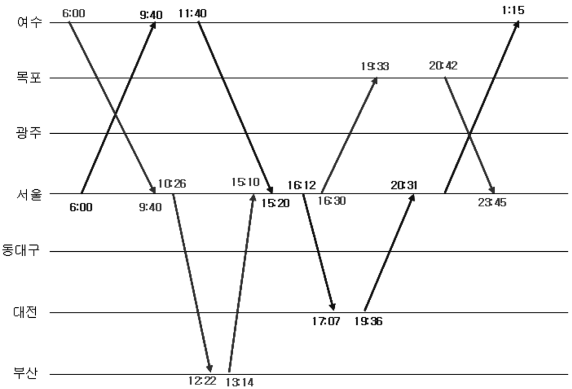


Fig. 1 Example of Routing model

그러나 이는 현실적으로 불가능하므로 Fig. 2에서 보여지는 것처럼 간단한 계산식을 사용한다. 이는 운행시간과 열차 반복시간의 합을 운행간격시간으로 나누고 왕복을 고려하여 2를 곱한다. 이 때 시격은 열차의 운행계획시간을 투입되는 전체 열차수로 나누는데, 열차의 운행계획시간을 어떻게 설정하느냐에 따라 많은 차이를 발생시킬 수 있다.

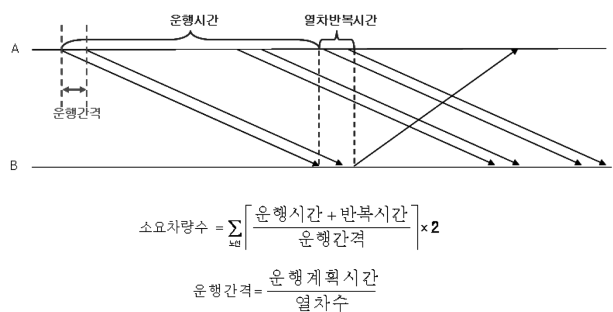


Fig. 2 Calculation method for required rail cars

2.3 분석 과정

분석 과정은 경부선을 예를 들어 설명하였으며, 총 4단계로 아래와 같다.

단계1: 정차역 설정 및 역간수요 도출

우선 경부선 서울~부산 구간의 정차역은 서울, 영등포, 수원, 평택, 천안, 조치원, 대전, 영동, 김천, 구미, 왜관, 대구, 동대구, 경산, 밀양, 구포, 부산의 17개역을 설정하였다. 열차운영계획 분석을 위한 기준 수요는 기존 선형연구[4]에서 분석한 TTX를 투입하는 대안의 2013년 수요예측 결과를 활용하여 역간 수요로 재추정하였다. 추정 방식은 2005년 역

Table 1 Normalized Railroad Demand of Kyung-Bu line (Southbound)

단위: 통행/일

| 도착 출발 | 서울 | 영등포 | 수원 | 평택 | 천안 | 조치원 | 대전 | 영동 | 김천 | 구미 | 왜관 | 대구 | 동대구 | 경산 | 밀양 | 구포 | 부산 | 합계 |
|----------|----|-----|-----|-----|-------|-----|-------|-----|-----|-------|----|-------|-------|-----|-----|-------|-------|--------|
| 서울 | 20 | 0 | 222 | 131 | 566 | 109 | 725 | 61 | 250 | 814 | 39 | 298 | 507 | 28 | 37 | 187 | 960 | 4,954 |
| 영등포 | 0 | 0 | 83 | 37 | 448 | 78 | 890 | 50 | 155 | 603 | 22 | 255 | 333 | 20 | 24 | 146 | 472 | 3,616 |
| 수원 | 0 | 0 | 0 | 9 | 109 | 35 | 827 | 26 | 99 | 438 | 14 | 338 | 512 | 25 | 44 | 220 | 852 | 3,548 |
| 평택 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 48 | 2 | 4 | 19 | 2 | 25 | 46 | 2 | 2 | 12 | 53 | 217 |
| 천안 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 149 | 4 | 19 | 61 | 1 | 46 | 61 | 4 | 4 | 22 | 108 | 483 |
| 조치원 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19 | 0 | 3 | 5 | 0 | 3 | 12 | 0 | 1 | 3 | 18 | 64 |
| 대전 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 26 | 77 | 230 | 6 | 64 | 56 | 6 | 9 | 30 | 123 | 627 |
| 영동 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 5 | 0 | 7 | 6 | 0 | 0 | 2 | 15 | 36 |
| 김천 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0 | 47 | 56 | 6 | 2 | 9 | 52 | 182 |
| 구미 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 79 | 109 | 8 | 8 | 57 | 235 | 497 |
| 왜관 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 8 | 0 | 0 | 5 | 16 | 33 |
| 대구 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 10 | 78 | 353 | 445 |
| 동대구 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 42 | 75 | 293 | 1,246 | 1,656 |
| 경산 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 24 | 106 | 133 |
| 밀양 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 39 | 154 | 193 |
| 구포 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 |
| 부산 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 합계 | 20 | 0 | 305 | 177 | 1,125 | 226 | 2,658 | 169 | 608 | 2,185 | 85 | 1,166 | 1,709 | 142 | 219 | 1,127 | 4,765 | 16,686 |

간수요 실측 자료를 기준으로 하여, 선행연구에서 제시한 구간 통과수요의 변화를 고려하여 산정한 것이다. 하행 기준으로 분석하였으며 추정한 결과는 Table 1과 같다.

단계2: TPS 분석

단계1에서 설정한 중간 정차역 모두에 정차하는 경우와 15개 중간 정차역 각각에 대해서 정차하지 않는 대안을 설정하여 TPS 분석한 결과는 Table 2와 같다.

단계3: 역간 통행시간 산정

중간 정차역인 영등포, 수원, 평택, 천안, 조치원, 대전, 영동, 김천, 구미, 왜관, 대구, 동대구, 경산, 밀양, 구포역을 통과할 때와 정차할 때의 통행시간 차이는 순서대로 0.97, 1.05, 1.09, 1.04, 1.07, 1.07, 1.07, 1.07, 1.08, 1.06, 1.07, 1.07, 1.03, 1.03, 1.08분이 되는 것으로 분석된다. 이상의 분석 결과를 기준으로 하여 출발역과 도착역간 직행 통행시간을 산정한 결과는 Table 3에 제시하였다.

단계4: 최적 열차운영체계 도출 및 소요차량수 산정

주어진 역간 수요와 통행시간을 이용하여 수요를 충족시키기 위해 필요한 최소한의 열차 운행횟수는 31회로 분석되었다. 최적화 프로그램을 이용하여 최적 열차운영 방안을 산정한 결과, 31개 열차의 평균 정차횟수는 3.8회, 평균운행시간은 206.4분으로 분석되어 전역 정차에 비해서 23.1분 단축되는 것으로 분석되었다. 각 열차별 최적 정차 패턴은

Table 2 TPS Result of all stopping Kyung-Bu line (TTX)

| 구 간 | 거리 (km) | 주행시간 (분) | 표정속도 (km/h) | 입력 에너지 (kWh) | 회생 에너지 (kWh) |
|----------|---------|----------|-------------|--------------|--------------|
| 서울 - 영등포 | 9.10 | 5.23 | 104.47 | 142.71 | 136.45 |
| 영등포 - 수원 | 32.39 | 15.63 | 124.36 | 259.44 | 198.20 |
| 수원 - 평택 | 33.56 | 16.07 | 125.33 | 259.15 | 270.83 |
| 평택 - 천안 | 22.03 | 10.88 | 121.46 | 215.14 | 170.14 |
| 천안 - 조치원 | 32.73 | 16.42 | 119.56 | 404.89 | 367.70 |
| 조치원 - 대전 | 37.00 | 17.65 | 125.74 | 415.55 | 348.43 |
| 대전 - 영동 | 45.63 | 20.83 | 131.40 | 311.11 | 208.75 |
| 영동 - 김천 | 42.21 | 19.59 | 129.30 | 341.28 | 329.27 |
| 김천 - 구미 | 22.87 | 10.88 | 126.06 | 129.57 | 130.62 |
| 구미 - 왜관 | 24.99 | 12.08 | 124.16 | 234.47 | 201.95 |
| 왜관 - 대구 | 21.39 | 10.47 | 122.59 | 189.19 | 147.92 |
| 대구 - 동대구 | 3.20 | 2.45 | 78.35 | 87.76 | 73.50 |
| 동대구 - 경산 | 12.31 | 6.65 | 110.99 | 165.81 | 125.35 |
| 경산 - 밀양 | 44.65 | 20.76 | 129.03 | 421.16 | 240.65 |
| 밀양 - 구포 | 44.00 | 20.50 | 128.74 | 300.23 | 269.59 |
| 구포 - 부산 | 16.43 | 8.45 | 116.70 | 212.62 | 196.29 |
| TOTAL | 444.49 | 229.54 | 116.19 | 4,090.08 | 3,415.64 |

Table 4에 제시되어 있다. 이를 활용하여 2.2에서 제시한 방법으로 소요차량수를 산정할 수 있다.

Table 3 Travel times between the stations on Kyung-Bu (TTX)

| 출발역 | 도착역 | 거리(km) | 시간(분) | 투입에너지 | 회생에너지 |
|-----|-----|--------|-------|---------|--------|
| 서울 | 영등포 | 9.1 | 5.2 | 142.7 | 136.5 |
| 서울 | 수원 | 41.5 | 19.9 | 367.1 | 302.3 |
| 서울 | 평택 | 75.1 | 34.9 | 571.1 | 522.4 |
| 서울 | 천안 | 97.1 | 44.7 | 708.7 | 621.6 |
| 서울 | 조치원 | 129.8 | 60.1 | 1,059.1 | 939.1 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 경산 | 구포 | 88.7 | 40.2 | 667.4 | 460.92 |
| 경산 | 부산 | 105.1 | 47.6 | 801.8 | 585.7 |
| 밀양 | 구포 | 44.0 | 20.5 | 300.2 | 269.59 |
| 밀양 | 부산 | 60.4 | 27.9 | 434.7 | 394.37 |
| 구포 | 부산 | 16.4 | 8.5 | 212.6 | 196.29 |

Table 4 Result of Kyung-Bu's Optimized Railroad Operation (TTX)

| 열차번호 | 정차패턴 | 정차횟수 | 운행시간 | 에너지 | |
|------|---------------------------------------|------|-------|---------|---------|
| | | | | 투입 | 회생 |
| 1 | 1, 3, 6, 9, 10, 13, 14, 17 | 6 | 211.1 | 3,503.5 | 2,879.4 |
| 2 | 1, 12, 17 | 1 | 200.8 | 3,195.9 | 2,596.7 |
| 3 | 1, 2, 10, 17 | 2 | 202.7 | 3,231.3 | 2,629.1 |
| 4 | 1, 2, 3, 10, 14, 17 | 4 | 206.8 | 3,327.3 | 2,718.1 |
| 5 | 1, 2, 10, 16, 17 | 3 | 204.8 | 3,309.5 | 2,700.6 |
| 6 | 1, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 13, 17 | 7 | 213.2 | 3,611.0 | 2,976.0 |
| 7 | 1, 17 | 0 | 198.7 | 3,120.2 | 2,527.4 |
| 8 | 1, 7, 8, 10, 13, 14, 17 | 5 | 209.0 | 3,460.8 | 2,838.3 |
| 9 | 1, 4, 9, 10, 12, 14, 16, 17 | 6 | 211.1 | 3,534.2 | 2,906.4 |
| 10 | 1, 3, 4, 5, 7, 10, 11, 16, 17 | 7 | 213.2 | 3,600.2 | 2,966.5 |
| 11 | 1, 2, 5, 10, 17 | 3 | 204.8 | 3,285.7 | 2,679.4 |
| 12 | 1, 7, 9, 11, 12, 13, 17 | 5 | 209.0 | 3,474.4 | 2,850.8 |
| 13 | 1, 2, 7, 12, 13, 14, 17 | 5 | 208.9 | 3,422.5 | 2,804.1 |
| 14 | 1, 13, 16, 17 | 2 | 202.8 | 3,272.7 | 2,666.9 |
| 15 | 1, 2, 13, 14, 15, 17 | 4 | 206.8 | 3,324.4 | 2,715.2 |
| 16 | 1, 9, 11, 12, 13, 14, 16, 17 | 6 | 211.1 | 3,517.1 | 2,891.5 |
| 17 | 1, 2, 3, 4, 8, 10, 11, 12, 15, 16, 17 | 9 | 217.2 | 3,707.1 | 3,064.7 |
| 18 | 1, 5, 7, 14, 15, 16, 17 | 5 | 208.9 | 3,424.1 | 2,805.6 |
| 19 | 1, 3, 7, 10, 15, 17 | 4 | 206.9 | 3,381.8 | 2,765.9 |
| 20 | 1, 2, 17 | 1 | 200.7 | 3,155.2 | 2,559.8 |
| 21 | 1, 17 | 0 | 198.7 | 3,120.2 | 2,527.4 |
| 22 | 1, 10, 12, 13, 17 | 3 | 204.9 | 3,346.3 | 2,734.1 |
| 23 | 1, 2, 3, 7, 8, 12, 16, 17 | 6 | 211.0 | 3,513.7 | 2,886.8 |
| 24 | 1, 3, 17 | 1 | 200.7 | 3,175.3 | 2,578.2 |
| 25 | 1, 3, 17 | 1 | 200.7 | 3,175.3 | 2,578.2 |
| 26 | 1, 13, 16, 17 | 2 | 202.8 | 3,272.7 | 2,666.9 |
| 27 | 1, 2, 6, 7, 15, 16, 17 | 5 | 208.9 | 3,435.1 | 2,815.4 |
| 28 | 1, 3, 16, 17 | 2 | 202.8 | 3,253.5 | 2,649.8 |
| 29 | 1, 2, 12, 17 | 2 | 202.7 | 3,231.0 | 2,629.1 |
| 30 | 1, 2, 5, 7, 9, 10, 13, 15, 17 | 7 | 213.0 | 3,556.1 | 2,925.4 |
| 31 | 1, 3, 4, 13, 17 | 3 | 204.9 | 3,327.3 | 2,717.1 |
| 평균 | | 3.8 | 206.4 | 3,363.4 | 2,750.0 |

주: 정차패턴에서 역번호 체계는 서울(1), 영등포(2), 수원(3), 평택(4), 천안(5), 조치원(6), 대전(7), 영동(8), 김천(9), 구미(10), 왜관(11), 대구(12), 동대구(13), 경산(14), 밀양(15), 구포(16), 부산(17)

3. 사례 분석

기준이 되는 역간수요와 TPS 분석 결과를 활용하여 최적화 프로그램에 의해 열차운영계획을 세워 소요차량수를 계산함으로써 기존의 방법에 의한 결과와 비교하여 절감분을 계산한다. 본 논문에서 제시되는 소요차량수 절감분은 TPS 시뮬레이션 결과를 기초 자료로 활용하였기 때문에 현실과는 일부 차이가 발생할 수 있다. 그러나 시뮬레이션 자료가 현실을 완전하게 반영하지는 않더라도 최대한 현실을 모사하도록 설정하였기 때문에 절대적인 값은 다소 차이가 날 수 있지만 상대적인 비교 결과는 충분히 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 본 절에서는 비교분석을 위해서 기존 방식에 의한 분석결과가 있는 선행연구[4]에서 대상으로 한 주요 6개 노선에 대해서 앞에서 설명한 분석과정을 거쳐서 결과를 도출하였으며, 분석 차종은 EMU와 TTX를 대상으로 하였다.

3.1 소요차량수 및 평균통행시간 산정

최적 열차운영체계 수립에 의해서 소요차량수의 변화가 나타나는 지를 살펴보았다. 소요차량수 산정에 있어 선행연구에서 가정한 사항과 동일한 가정을 하였는데, 이것은 선행연구와 본 연구의 결과를 동등한 조건에서 비교하기 위해서이다. 내용은 1열차당 좌석수는 556석, 평균 승차율은 64%, 운행시간은 16시간, 열차반복시간은 45분을 적용하였고, 예비 및 검수를 위한 추가 차량의 비율은 10%를 가정하였다.

본 논문에서는 평균통행시간 변화에 따른 소요차량수의 변화만 분석하였으며, 선행연구[4]에서 설정한 개통년도인 2013년에 대한 결과를 예시로 제시하였다. Table 5의 EMU 분석 결과를 보면 2013년 기준시점으로 분석한 경우, 경부선, 호남선, 중앙선의 경우에는 열차운영체계를 최적으로 할 경우 소요차량수가 줄어드는 것으로 분석되었지만, 나머지 노선의 경우에는 차이가 없는 것으로 분석되었다. 통과수요가 많은 경우는 열차운영을 최적으로 할 경우의 효과가 차량수 반올림에 의해 상쇄되는 경우가 발생하지 않았기 때문에 소요차량수가 줄어드는 결과를 보였다. TTX의 경우, EMU에 비해서는 작은 수치를 보이는데 전역 정차를 하더라도 EMU에 비해서 절대적인 통행시간이 크지 않기 때문에 판단된다. 호남선, 경전선, 중앙선의 경우에는 소요차량수에 변화가 없는 것으로 분석되었다. 그러나 특정 시점에서는 차이가 발생하지 않을 수 있지만, 연도별로 분석할 경우에는 필요한 열차수가 감소하는 경우가 발생한다. 즉 소요차량수 변화는 특정 시점뿐만 아니라 다양한 시점에 대한 분석을 하여야만 보다 확실하게 파악할 수 있으며, 열차운행횟수가 많을수록 그 효과도 분명하게 나타나는 것으로 분석된다.

최적화 프로그램을 활용하여 열차운영계획을 설정할 경우 기존의 방식에 비해서 보다 합리적으로 열차수를 산정할 수 있다. 특히, 열차의 정차 패턴과 통행시간을 최적화함으로써 경제성 분석에서 매우 중요한 부분인 소요차량비를 줄일 수 있게 되며, 부수적으로 동일한 열차운행횟수를 운행하면서도 열차의 총운행시간이 감소하기 때문에 동력비, 승무원 인건비 등 열차운영과 관련된 비용이 절감되게 된다.

3.2 경제성 분석에 미치는 영향

선행연구[4]에서 분석한 6개 노선에 대해서 최적화에 의한 열차운영계획을 수립하는 것이 경제성 분석에 어떠한 영향을 주는 지를 분석하였다. 우선 소요차량수 변동의 계산은 선행연구에서 설정한 분석기간인 개통년도 기준 향후 30년과 동일하게 시점을 통일하여 분석하였다. Table 5는 2013년에 대해서 분석한 예를 제시한 것인데 경제성 분석에 미

Table 5 Average Travel Time by number of rail cars (based on year 2013)

| 구 분 | 소요차량수 (편성) | | | 평균통행시간 (분) | | | |
|-------|------------|-------|----|------------|-------|-------|------|
| | 전역 정차 | 최적 패턴 | 차이 | 전역 정차 | 최적 패턴 | 차이 | |
| E M U | 경부선 | 22 | 20 | 2 | 253.6 | 230.9 | 22.7 |
| | 호남선 | 8 | 7 | 1 | 229.1 | 205.6 | 23.5 |
| | 전라선 | 7 | 7 | 0 | 250.3 | 232.8 | 17.5 |
| | 경전선 | 5 | 5 | 0 | 252.5 | 238.6 | 13.9 |
| | 충북선 | 4 | 4 | 0 | 106.4 | 95.5 | 10.9 |
| | 중앙선 | 4 | 3 | 1 | 152.9 | 141.4 | 11.5 |
| T T X | 경부선 | 20 | 19 | 1 | 229.5 | 206.4 | 23.1 |
| | 호남선 | 7 | 7 | 0 | 212.8 | 188.3 | 24.4 |
| | 전라선 | 7 | 6 | 1 | 231.4 | 213.9 | 17.5 |
| | 경전선 | 5 | 5 | 0 | 252.0 | 235.8 | 16.2 |
| | 충북선 | 4 | 3 | 1 | 96.8 | 86.0 | 10.8 |
| | 중앙선 | 3 | 3 | 0 | 150.5 | 140.2 | 10.3 |

주: 전역정차 자료 및 차량비 단가는 선행연구[4]에서 제시한 값을 인용하였으며, 차량구입비 단가는 EMU 19억원/량, TTX 22억원/량

치는 영향을 파악하기 위해서 5~10년 단위의 주요 연도별로 Table 5와 같은 분석을 수행한 후 중간년도는 보간법을 사용하여 계산하였다.

Table 6에 나타난 분석 결과처럼 EMU의 경우 중앙선은 변화가 없는 것으로 분석되었으며, 기타 노선은 노선에 따라서 4.2~7.8% 정도 경제성이 향상되는 것으로 분석되었다. TTX의 경우 경전선, 전라선, 중앙선은 변화가 없는 것으로 분석되었으며, 기타 노선은 노선에 따라서 2.9~7.7% 정도 경제성이 향상되는 것으로 분석되었다. 비용편익비에 변화가 없는 노선은 절대적인 열차소요수가 적어서 열차운영계획 최적화에 의한 효과가 소요차량수 산정시 소수점 첫째 자리에서 반올림함에 따라 사라지는 것으로 분석되었다. 즉 소요차량수를 산정할 때 필요한 열차수는 소수점 첫째 자리에서 올림 처리를 하게 되므로 기존 연구에서의 소요차량수가 3.8로 계산되면 4편성으로 처리한다. 열차운영계획 최적화에 따른 소요차량수가 3.2로 개선되더라도 필요한 차량수는 여전히 4편성이 되어 절감 효과가 없는 것으로 나올 수도 있다. 이러한 현상은 절대적인 소요차량수가 적은 노선에서 나타날 가능성이 높다.

4. 결 론

본 논문에서는 철도투자사업의 경제성을 제고하기 위한 방법으로서 최적화에 의한 열차운영계획을 반영하여 소요차량수를 산정하는 방안을 제시하였다. 경제성 분석에 미치는 영향을 선행연구의 사례로 분석한 결과 수요가 적어서 절대적인 소요차량수가 적은 경우에는 경제성에 미치는 영향이 없는 경우도 있었으나 대부분의 사례에서 2.9~7.7% 정도의 경제성이 향상되는 것으로 분석되었다. 본 연구에서 제시한 방법은 기존선에 고성능의 새로운 차량을 투입하는 경우뿐만

Table 6 Analysis of variance by required rail combinations for each lines

단위: 백만원

| 구 분 | 선행연구 | | | | 소요차량수 변화 반영 B/C (B) | 증감 (%) (B-A)/A | |
|-------|-------|---------|---------|---------|---------------------|----------------|-----|
| | 개통 년도 | 편익 현재가치 | 비용 현재가치 | B/C (A) | | | |
| E M U | 경부선 | 2009 | 473,256 | 389,541 | 1.21 | 1.31 (361,262) | 7.8 |
| | 호남선 | 2009 | 127,207 | 147,465 | 0.86 | 0.93 (136,870) | 7.7 |
| | 경전선 | 2012 | 86,822 | 99,653 | 0.87 | 0.94 (92,578) | 7.6 |
| | 전라선 | 2012 | 78,780 | 95,424 | 0.83 | 0.87 (90,452) | 5.5 |
| | 중앙선 | 2013 | 47,694 | 70,625 | 0.68 | 0.68 (70,625) | 0.0 |
| | 충북선 | 2013 | 55,422 | 73,840 | 0.75 | 0.78 (70,850) | 4.2 |
| T T X | 경부선 | 2013 | 967,149 | 473,672 | 2.04 | 2.20 (439,713) | 7.7 |
| | 호남선 | 2013 | 248,350 | 190,796 | 1.30 | 1.34 (185,468) | 2.9 |
| | 경전선 | 2013 | 194,025 | 126,900 | 1.53 | 1.53 (126,900) | 0.0 |
| | 전라선 | 2013 | 218,291 | 150,681 | 1.45 | 1.45 (150,681) | 0.0 |
| | 중앙선 | 2013 | 76,408 | 85,528 | 0.89 | 0.89 (85,528) | 0.0 |
| | 충북선 | 2013 | 117,848 | 92,901 | 1.27 | 1.32 (89,439) | 3.9 |

주: 1. 편익 및 비용의 현재가치는 2005년 기준

2. 소요차량수 변화 반영 비용편익비는 선행연구에서 소요편성수를 계산하는 방식에서 평균통행시간을 본 연구에서 제시한 방법으로 계산할 경우의 값이며, 괄호안은 변화된 비용의 현재가치를 나타낸 것임

아니라 일반 철도건설사업에서도 계획 단계에서 활용할 경우 보다 합리적인 소요차량수 산정을 가능하게 함으로써 철도사업의 경제성 개선에 도움이 될 것으로 판단된다.

본 연구에서는 소요차량수의 변화만을 고려하였으나 정차 패턴의 최적화에 따라 통행시간도 줄어들게 된다. 기존의 전역정차 방식에 따른 통행시간을 적용하는 것보다 줄어든 통행시간을 적용할 경우 철도를 이용하는 수요의 시간절감 편익도 증가하고, 타 수단으로부터 철도로의 수요전환량도 늘어나게 된다. 이러한 추가적인 수요전환량의 산정은 개선된 통행시간을 수단분담모형의 적용 단계부터 수요예측을 다시 반복함으로써 도출할 수 있을 것이며 이로부터 도출된 수요를 다시 사용하여 정차 패턴의 최적화를 수행할 수 있다. 이러한 과정은 많은 시간과 비용이 추가될 수 있으므로 어느 정도의 반복횟수를 설정할 것인가에 대한 연구도 필요하다.

참고문헌

- [1] The Korea Transport Institute (2007) The Evaluation Study on the Socio-economic Value of Railroad.
 - [2] J. Lee, K. Kim, and J. Eom (2009) A methodology study for estimating the benefits of tilting train deployment, *Journal of the Korean Society for Railway*, 12(5), pp. 700-706.
 - [3] B. Park, S. Oh, S. Hong, and D. Moon (2005) Railway line planning considering the configuration of lines with various halting patterns, *Journal of Korean Society of Transportation*, 23(6), pp. 115-125.
 - [4] MOCT & KICTEP (2007) Development of System Management and Interface Technology.
 - [5] MOCT (2004) Guidelines on the Evaluation of Public Transportation Facilities Development.
 - [6] MLTM & KICTEP (2008) An Effectiveness Analysis of Tilting Train Operations.
 - [7] KDI (2004) A Study on Standard Guidelines for Pre-feasibility Study on Road and Railway Projects (4th Edition).
 - [8] KDI (2004) A Study on General Guidelines for Pre-feasibility Study (4th Edition).
 - [9] Korea Rail Network Authority (2006) A Study on the Improvement Methods of Railway Investment Evaluation Structure.
 - [10] Korean Society of Transportation (2006) Handbook on the Evaluation of Railway Investment.
 - [11] Steer Davis Gleave (2000) *Rail Passenger Quality Service Valuations*.
 - [12] T. Litman (2003) *Transportation Cost Analysis*, VTPI.
 - [13] Appraisal Criteria (2003) *Strategic Rail Authority*.
- 접수일(2010년 3월 2일), 수정일(2010년 4월 6일),
게재확정일(2010년 5월 18일)