

서비스수준(LOS)을 감안한 고속철도 노선 및 차량관리방안

오재경* · 김시곤**

Oh, Jae Kyoung*, Kim, Si Gon**

A Study on Managing High-Speed Railway Links and Rolling Stocks Based on the Level of Service

ABSTRACT

In this paper, the level of service (LOS) is defined for high-speed railway links and rolling stocks. Based on this LOS, how to manage high-speed railway facility is also suggested. The LOS is divided into 6 levels from A to F. The measurement of effectiveness (MOE) for railway links is derived from the relationship between a total delay time and a railway link utilization ratio. Another MOE, volume over capacity (V/C), is also proposed. On the other hand, the LOS for high-speed railway rolling stocks is based on the density of people in a rolling stock. Above all, LOS D is defined to the total number of seats. Then, LOS A is 50% of the LOS D, LOS B is 70% of the LOS D, LOS C is 90% of the LOS D and LOS D~F is defined as the maximum seats and standing people at the level of each. Finally, a method to manage high-speed railway links and rolling stocks is proposed in order to keep the level of service at the target by the government.

Key words : Level of service, Railway capacity, Rolling stacking capacity, Railway facilities management

초 록

본 논문에서는 고속철도 노선 및 철도차량의 서비스수준을 정의하고 이를 감안한 철도노선 및 철도차량의 관리방안을 제시하였다. 고속철도시설의 서비스수준(LOS) 등급은 A부터 F까지 6단계로 구분하여 제안하였다. 우선, 고속철도 노선의 서비스수준을 나타내는 효과적도는 열차지연으로 정의하였다. 구체적으로는 총 지연시간과 노선이용률 간 관계를 활용하여 서비스수준을 구분하였다. 추가적으로 노선용량이용율(V/C)이라는 효과적도도 제시되었다. 한편, 고속철도 차량의 서비스수준을 결정짓는 효과적도는 차량 내 탑승 승객밀도로 정하였다. 좌석정원을 꽉 채우는 수준을 LOS "D"로 정의하고 LOS A는 LOS D의 50%, LOS B는 LOS D의 70%, LOS C는 LOS D의 90%, LOS E~F는 최대 좌석수에 입석승차수를 감안하였다. 마지막으로 정부에서 정한 목표 서비스수준을 유지할 수 있도록 철도노선과 철도차량을 관리하는 방안을 제시하였다.

검색어 : 서비스수준, 철도노선용량, 철도차량용량, 철도시설관리방안

* 서울과학기술대학교 철도전문대학원 박사과정 (Seoul National University of Science&Technology · Ohjkllove@nate.com)

** 종신회원 · 교신저자 · 서울과학기술대학교 철도전문대학원 교수

(Corresponding Author · Seoul National University of Science&Technology · sigonkim@seoultech.ac.kr)

Received September 4, 2017/ revised September 14, 2017/ accepted November 9, 2017

1. 서론

철도·도로부문의 서비스 수준은 철도·도로를 이용하는 여객이나 화물의 수송여건의 질을 나타내는 기준으로 여객 및 화물의 수송 여건이 어떠한 상태인가를 측정하는 지표로 정의된다. 즉, 이러한 지표를 활용하여 현재의 이용 및 활용 상태를 진단하고 서비스 수준 향상을 위한 투자계획, 운영계획의 수립이 가능하다. 이런 측면에서 철도·도로시설의 현재 운영상태 평가 및 미래 투자계획 수립을 위한 서비스 수준 평가지표는 매우 중요하다. 도로분야에서는 도로용량편람 제정(국토교통부)을 통해 도로 사용자가 느끼는 서비스 수준을 객관화시켜 A-F까지의 6단계로 구분된 서비스수준(LOS: Level of Service) 개념을 활용하고 있는 반면, 철도시설(철도노선 및 철도차량)의 경우 서비스 수준을 평가하기 위한 지표가 없어 현재 철도시설의 수준평가 및 철도용량부족을 해소할 미래 지향적인 투자계획 수립도 어려운 실정이다.

본 논문에서는 고속철도시설(철도노선 및 철도차량)의 서비스수준을 측정할 수 있는 객관적인 지표를 개발하고 이를 기반으로 현재의 철도시설 서비스 수준을 평가하고, 미래의 적정 서비스 수준을 유지할 수 있도록 하는 철도노선 및 철도차량의 관리방안을 제시하였다.

2. 선행연구검토

철도서비스 제공자 측면에서 서비스수준 평가지표는 공급성과 신뢰성으로 나눌 수 있다. 공급성 평가지표는 열차운행속도, 평균운행속도 및 혼잡도가 있고, 신뢰성 평가지표는 정시율(Punctuality)과 운행취소를(Cancelled trains)이 있다. 공급성 서비스수준 평가지표 중 혼잡도는 철도운영자 측면에서의 서비스 평가지표이므로 열차운행속도 및 평균운행속도를 실질적인 평가지표로 고려할 수 있다. 신뢰성 서비스수준 평가지표 중 운행취소는 사실상 0%(2010년 기준 KTX, 새마을, 무궁화열차 모두 운행취소율 0%)이므로 실질적 평가지표는 정시율을 고려할 수 있다. 이러한 측면에서 정시율은 열차 운행횟수에 따른 지연시간에 대한 함수이며, 또한 열차 지연시간을 이용하여 열차의 표정속도를 산출할 수 있다. 그러므로 철도 서비스수준 평가지표의 핵심지표는 열차지연이라 할 수 있다. 열차지연과 노선이용률 간 관계를 검토한 국내의 문헌을 검토한 결과 본 논문에 활용 가능한 연구는 크게 i) Gibson (2002)의 노선이용률(V/C)에 따른 지연시간 모형, ii) 이를 활용한 Kim and Kim (2006)의 모형, iii) 프랑스 철도의 교통밀도와 열차지연 간 관계를 검토한 Marlot (2013) 연구 iv) 스웨덴 열차 운영 자료를 기반으로 노선이용률과 열차지연 간 관계를 검토한 Lindfeldt (2015) 연구 등 4가지로 조사되었다.

Gibson (2002)은 시간대별 선구자료를 토대로 노선이용률이용률(V/C)에 따른 지체시간은 지수분포 특성을 갖는다고 주장하며, 선구특성상수 A_i 와 노선특성 상수인 β (1.0-4.0 수준이며, 대부분 2~3 규모로 추정)를 사용한 모형을 제시하였다. Gibson (2002)이 제시한 모형은 선구특성상수(A_i)와 노선특성상수(β)를 추정하는 방법이 제시되지 않고 있으며, 제시된 모형을 통해 산출되는 지연시간의 단위 또한 제시되지 않아 이 연구결과를 활용하기 위한 정보가 매우 부족하였다. 또한 Gibson의 모형을 활용할 때, 국내 환경에 맞도록 각 선구별 노선이용률과 지연시간의 실측 자료가 있어야 모형의 정산(calibration)이 가능하나, 국내에서는 열차운영에 따른 열차지연 및 노선이용률을 분석할 수 있는 자료가 없어 본 논문에서 적용하는 것은 한계점이 있었다.

$$D_{it} = A_i \times \exp(\beta \times C_{it}) \quad (1)$$

여기서, D_{it} : 선구 i 에서 시각 t 일 때의 지연시간

A_i : 선구 i 의 특성상수

β : 노선특성상수

C_{it} : 선구 i 에서 시각 t 일 때 노선이용률 이용률(V/C)

Kim and Kim (2006)는 Gibson (2002)의 연구결과를 국내 환경에 맞도록 변환하여 제시하였는데, Gibson (2002) 모형에서 파라미터 A_i 는 0.25, β 는 2.5로 추정하였다.

$$DT = 0.25 \times \exp(2.5 \times \frac{N(\alpha)}{N(0)}) \quad (2)$$

여기서, DT : 열차지연시간

$N(\alpha)$: 여유시분을 고려한 운행 여유율이 α 일 경우의 열차운행횟수

$N(0)$: 운행 여유율을 고려하지 않은 경우의 열차운행횟수(용량)

Marlot (2013)는 프랑스 철도의 교통밀도와 서비스수준 사이의 상관관계를 보여주며, 열차지연은 교통밀도와 함께 증가한다고 제시하였다. 시간당 열차 12회, 즉 평균 차두간격(headway)이 5분/train 이하일 경우 평균열차지연이 급격히 증가함을 보여주어 국내 철도환경과 유사한 결과를 보여주었다(Fig 1). Marlot (2013)의 연구 또한 노선이용률과 열차지연 간 관계는 제시 가능하나 열차지연의 측정단위가 제시되어 있지 않아 제시된 열차지연이 발생하는 선구의 범위를 알 수 없어 본 논문에서 적용할 수 있는 정략적 수치 제시는 어려운 것으로 검토되었다.

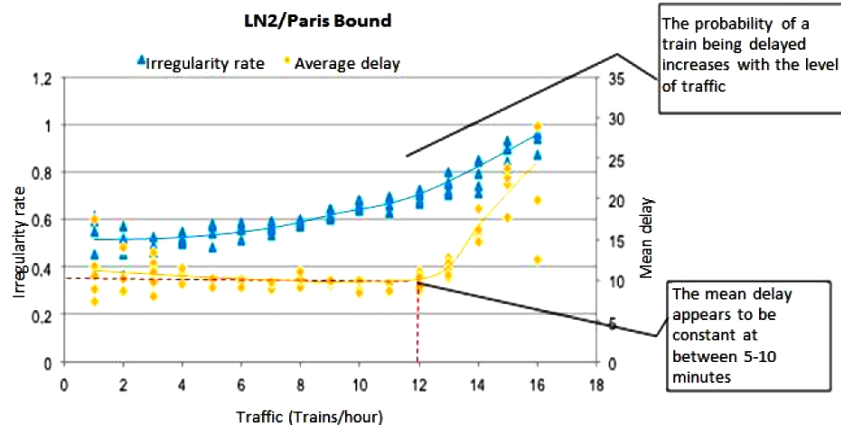


Fig. 1. The Number of Trains per Hour vs. Irregularity Rate

Table 1. Simulation Scenario Showing Headway vs. Perturbation Level

| Inter-station distance (km) | Variant number | Vehicle composition (HS: high-speed, IC: intercity, FR: freight) | Headway (headway, % of minimum) | Perturbation level |
|-----------------------------|----------------|--|---------------------------------|--------------------|
| 20 | 1 | 100% HS | 100 | Low |
| | 2 | 100% IC | | |
| | 3 | 100% FR | | |
| 30 | 4 | 50% HS, 50% IC | 116 | |
| | 5 | 50% HS, 50% FR | 138 | |
| | 6 | 50% IC, 50% FR | | |
| | 7 | 67% HS, 33% IC | 171 | |
| | 8 | 67% HS, 33% FR | | |
| 40 | 9 | 33% HS, 67% IC | 223 | High |
| | 10 | 33% HS, 33% IC, 33% FR | | |
| | 11 | 33% HS, 33% FR, 33% IC | 322 | |
| | 12 | 33% HS, 67% FR | | |
| | 13 | 67% IC, 33% FR | | |
| | 14 | 33% IC, 67% FR | | |

Source: A. Lindfeldt(2015), Railway capacity analysis, KTH Royal Institute of Technology

Lindfeldt (2015)는 스웨덴의 실제 열차운영 자료를 기반으로 열차운행회수(노선이용률)와 열차지연 간 시뮬레이션 모형을 정산하고 열차종별 구성비를 달리하여 열차운행회수(노선이용률)와 열차지연 간 관계를 나타냈으며, 각 차종별 운행속도와 열차지연의 구체적 수치 및 시간당 열차운행회수(train/h)에 따른 열차지연(1차 지연, 2차 지연)을 제시하고 있다. Table 1은 노선이용률과 열차지연의 분석 시나리오다. 국외(스웨덴)의 사례이긴 하나 실제 열차운영 자료에 기반 한 모형 정산을 수행하였을 뿐 아니라 열차운행회수, 차종별 열차운행속도, 정량화된 열차지연이 모두 제시되어 기존 연구결과 중 가장 활용도가 높다고 판단된다. 따라서 본 논문에서는 Lindfeldt (2015)의 연구결과를 활용하여 열차지연과 노선이

이용 간 관계를 추정하고, 철도 서비스수준 결정에 활용하였다.

3. 고속철도노선의 서비스수준 지표 개발

3.1 서비스수준 지표 MOE 선정

철도노선의 서비스 평가를 위한 지표 가운데 속도로 표현될 수 있는 공급성 지표는 열차지연시간의 크기에 따라 결정된다. 이 열차지연시간의 유무에 따라 정시율이 달라지기 때문에 철도서비스수준(LOS)을 선정하기 위한 MOE는 ‘열차지연시간’을 중심으로 검토하였다. 철도노선부문 LOS 평가지표의 핵심지표로서 ‘열차지연’은 ‘여유시분’과 반비례관계에 있고, ‘여유시분’은 ‘노선

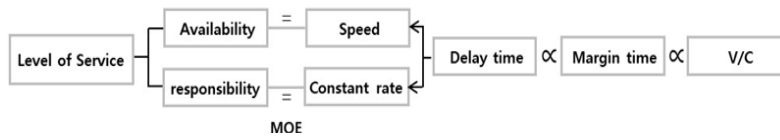


Fig. 2. Relationships between Factors Affecting the LOS for Railway Links

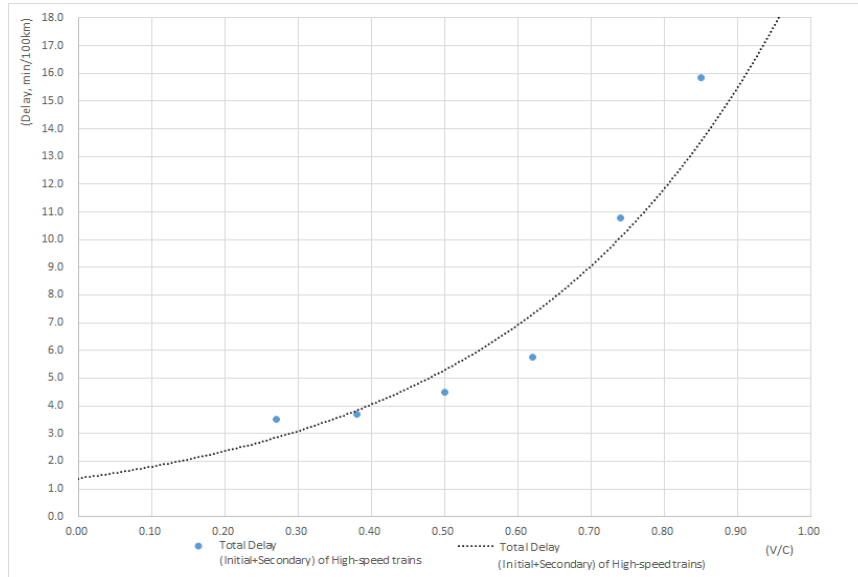


Fig. 3. Total Delay Function of High Speed Train

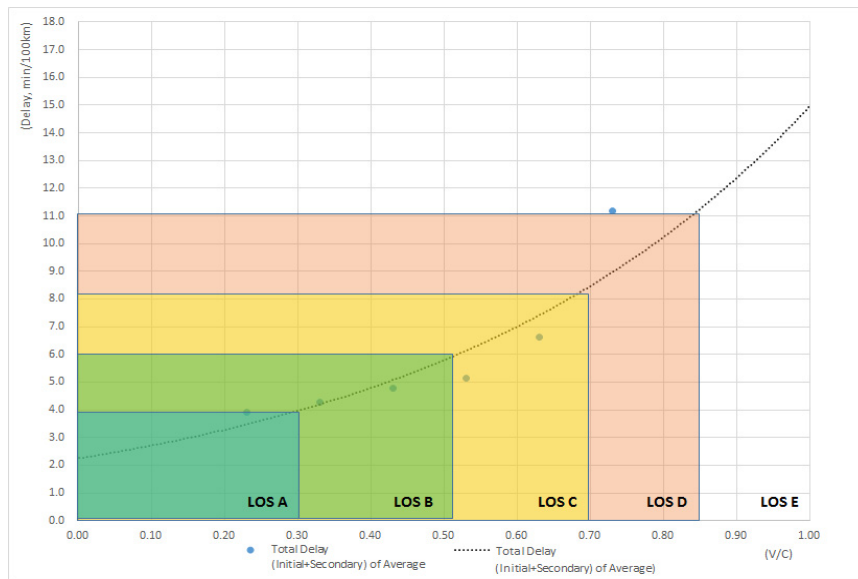


Fig. 4. Distribution of LOS Considering a Railway Link Utilization Rate and Train Delay

이용률(V/C)과 반비례관계에 있다. 즉, 여유시분은 열차지연발생 시 회복운전을 위해 활용할 수 있는 완충(buffer)의 역할을 하기 때문에 여유시분이 클수록 열차지연은 감소하며 열차지연 증가 및 확산 방지를 위해 여유시분이 커질수록 노선용량의 활용수준,

즉 노선이용률(V/C)은 낮아지는 것이다. 열차지연과 노선이용률간의 관계도는 Fig. 2와 같다.

본 논문에서는 Lindfeldt (2015)에서 제시된 연구결과를 활용하여 노선이용율(V/C)과 열차지연(1차 지연, 2차 지연) 간 관계를

추정하였다. 먼저, Lindfeldt (2015)에서 제시된 열차운행회수 (trains/h)는 용량상태 대비 제시된 열차운행 횟수를 노선이용률 (V/C)로 산출하고 이 때 열차 차두간격(headway) 6분/train을 용량상태(LOS 'E')로 가정하여 용량상태의 열차운행회수는 10 trains/h로 계산하였다. 또한 해당 연구에서 적용한 열차지연 요소 중 exit delay와 entry delay를 1차 지연으로, secondary delay on line sections, secondary delay at stations를 2차 지연으로 반영하였다. 마지막으로, 1차 지연과 2차 지연을 합친 총지연과 노선이용률간의 관계를 나타내고, 이를 바탕으로 Gibson (2002)가 제시한 연구결과를 활용하여 회기선을 지수함수로 나타내었다. 세부결과는 Fig. 3과 같다.

이를 바탕으로 V/C=1.0일 때의 지연시간 15분/100km를 기준으로 LOS A를 열차지연 0~4분/100km으로, LOS B를 열차지연 4~6분/100km, LOS C를 열차지연 6~8분/100km, LOS D를 열차지연 8~11분/100km, LOS E를 열차지연 11~15분/100km으로 설정하였으며, LOS 등급별 지연시간 및 노선이용률(V/C)은 Fig. 4와 같다.

3.2 고속철도노선의 서비스수준 지표 도출

본 논문에서는 노선이용률과 열차지연을 고려한 LOS분포를 통하여 LOS A를 “지연 없음”으로 정의하고 지연 없음부터 순차적으로 6단계로 구분하여 철도 노선의 서비스수준 지표를 제시하고자 하며, 세부내용은 Table 2와 같다.

Table 2. Service Level of High-Speed Railway Links

| Level of Service | Contents | Delay Time (Minute per 100km) | V/C | The ratio of the running speed to the maximum running speed (%) |
|------------------|---|-------------------------------|--------|---|
| A | No delay | 0~4 | < 0.30 | 100 |
| B | Almost no delay | 4~6 | < 0.50 | 100 |
| C | Recovery (on-time) Possible delay | 6~8 | < 0.70 | 100 |
| D | Recovery (on-time) unrecoverable delay | 8~11 | < 0.85 | 100 |
| E | Recovery (on-time) unrecoverable delay | 11~15 | < 1.00 | 95 |
| F | Theoretical and practical operation is possible but inefficiency in railway operation | Under 15 | 1.00 ≤ | 85 |

Table 3. Occupied Area and Distance of Occupancy per Level of Service

| LOS | Capacity area | Separation distance | Condition |
|-----|-----------------|---------------------|---|
| A | 1.18 ≤ A | 1.2 ≤ L | Area of free flow |
| B | 0.78 ≤ A < 1.18 | 1.0 ≤ L < 1.2 | Allow others to pass without difficulty |
| C | 0.54 ≤ A < 0.78 | 0.8 ≤ L < 1.0 | Disturbed when passing through other people |
| D | 0.34 ≤ A < 0.54 | 0.6 ≤ L < 0.8 | Stand by without contact with others |
| E | 0.23 ≤ A < 0.34 | 0.4 ≤ L < 0.6 | Unable to contact without contact with others |
| F | A < 0.23 | < 0.4 | Adherence to others, psychological discomfort |

4. 고속철도차량의 서비스수준 지표 개발

4.1 고속철도차량 용량 산정

철도차량용량은 철도차량의 종류별로 한 차량 또는 한 편성에 몇 명을 태울 수 있는지를 정해 놓은 것으로 기본적으로 철도차량의 최대 좌석수와 최대 입석수를 합하여 산정할 수 있다. 철도차량 내 좌석 수는 결정이 되어있지만 입석 수는 한 차량 내 좌석을 제외하고 여유 공간에 최대로 서 있을 수 있는 입석 수를 구하여 적용하여야 한다. 본 논문에서는 최대 입석 수 산정을 위하여 국토부가 고시한 “환승센터 및 복합환승센터 설계 및 배치기준, 국토부 고시 제2015-1103호 기준”을 준용하기로 한다. 먼저, 최대 입석 수 산정은 “환승센터 및 복합환승센터 설계 및 배치기준”에서는 다음의 수식을 통하여 산정하며, 서비스수준 “E”를 최대 입석수로 결정하였다. 본 논문에서는 고속철도차량(KTX)의 차량용량을 산정하므로 입석 수는 LOS A, B를 적용한다. 왜냐하면 고속철도차량의 공간은 승무원이 통과할 수 있는 수준이어야 하기 때문이다. 이 수준이 LOS B이다. 입석 수별 서비스수준은 Table 3과 같다. 이를 감안한 고속철도 차량의 서비스수준은 Table 4와 같다.

$$C_{rv} = [(L \times W_{rv}) \div A_{LOSs} + N_s] \times N_{rt} \quad (3)$$

여기서, C_{rv} = 차량용량 (Capacity of Railway Vehicle)

L = 차량전장 (Length of Railway Vehicle)

W_{rv} = 차량폭 (Width of Railway Vehicle)

Table 4. LOS of Railway Rolling Stocks

| LOS | Number of seats | Evaluation criteria |
|-----|-----------------|--|
| A | 465 | 50% of Total seats |
| B | 651 | 70% of Total seats |
| C | 837 | 90% of Total seats |
| D | 931 | Total seats |
| E | 1,022 | Total seats + Standing (1.18 ≤ A) |
| F | 1,046 | Total seats + Standing (0.78 ≤ A < 1.18) |

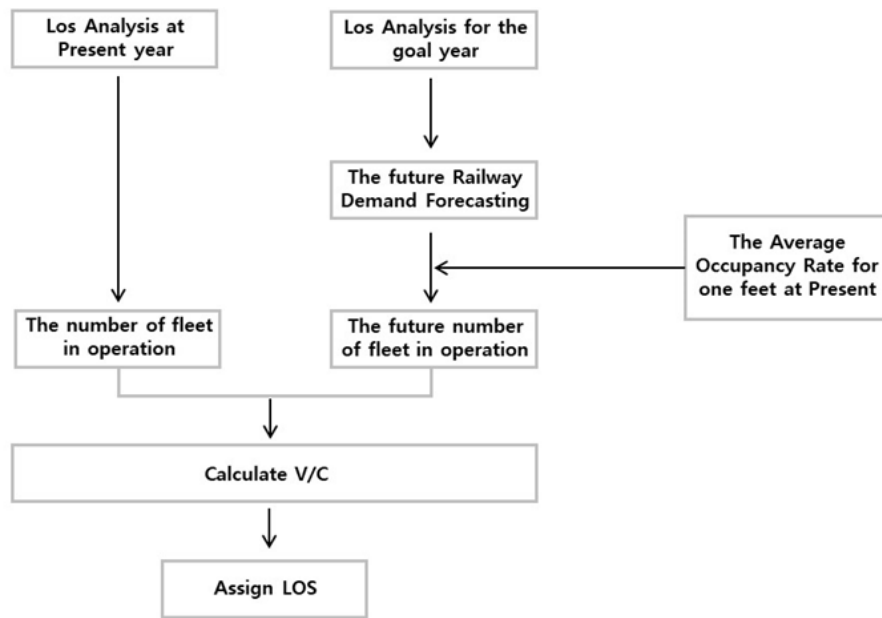


Fig. 5. Level of Service (LOS) Assessment Procedure for Railway Links

A_{LOSx} = LOSx일때 점유면적

N_s = 좌석수 (Number of Seat)

N_{rt} = 차량편성 수 (Number of Trainset)

사전에 예측함으로써 장래에 적정 서비스수준을 유지할 수 있도록 하는 것이다. 철도시설의 관리방안은 크게 철도노선과 철도차량관리방안으로 구분할 수 있다.

4.2 고속철도차량 서비스수준 도출

고속철도차량의 서비스수준은 입석을 제외한 좌석 정원의 점유율로 LOS A-D를 구분하고 E, F의 경우 정원에 입석수를 반영하여 적용하였다. 즉, 좌석정원인 931명을 LOS “D”로 정의하고 LOS A는 좌석의 50%, LOS B는 좌석의 70%, LOS C는 좌석의 90% 승차하는 기준으로 산정하는 것을 제안하였다.

5.1 고속철도노선의 관리방안

철도노선의 관리방안은 본 논문에서 제시한 철도노선의 서비스수준 지표를 활용하여 현재 LOS를 평가하고, 장래 연도별 서비스수준을 예측하여 비교분석을 통하여 노선용량이 포화되는 구간을 예측한 후, 적정 투자 및 우회노선 건설 등으로 병목구간을 사전 해소하는 것이다. 현재 및 장래년도 LOS평가 방안은 다음과 같다 (Fig. 5).

5. 고속철도시설(철도노선 및 철도차량)의 관리방안

철도시설의 관리방안은 장래 인구증가 및 환경변화에 따라 철도 이용 수요가 증가할 경우 열차운행 횟수는 늘어나게 되고 철도시설의 서비스수준은 낮아 질수 밖에 없으므로 철도이용수요 증가를

일례로 정부고속선의 서비스수준을 분석해 보았다. 그 결과 2020년부터 정부고속선 수도권 부분에서 LOS D, E가 발생할 것으로 예측된다. 이 경우 서비스수준 향상을 위하여 우회노선 건설 및 복복선 건설을 통하여 철도노선을 관리하는 것이다 (Fig. 6).

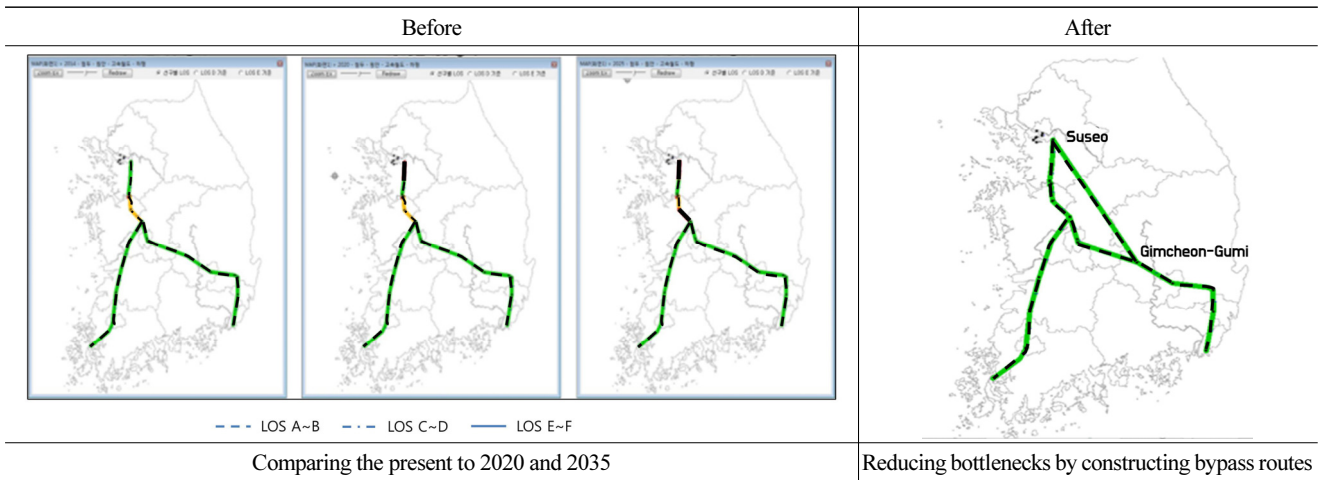


Fig. 6. An Example of LOS Assessment and Railway Link Management

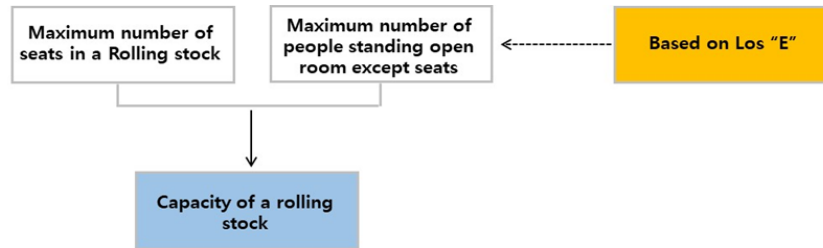


Fig. 7. Level of Service (LOS) Assessment Procedure for Rolling Stocks

5.2 고속철도차량의 관리방안

철도차량관리방안은 철도차량의 서비스수준 지표를 활용하여 이용수요 증가에 따른 현재와 미래 서비스수준을 비교, 서비스수준이 낮아질 경우 2층열차 도입(ITX-청춘 열차 개념)을 모색하여 철도차량의 서비스수준을 지속적으로 유지하는 관리 방안이다 (Fig. 7).

예를 들면, 철도노선 관리방안과 같이 경부고속선 구간별 철도차량 서비스수준을 분석한 후 특정 년도부터 경부고속선 수도권 구간에서 LOS D, E가 발생한다고 가정하였을 때 서비스수준 향상을 위하여 2층 열차를 투입할 것인지 노선수를 확대할 것인지 등으로 철도차량 서비스수준을 개선, 정부에서 목표로 하는 서비스수준을 지속적으로 관리하는 것이다.

6. 결론 및 향후연구과제

6.1 결론

본 논문에서는 해석적 방법을 적용하여 고속철도를 중심으로 철도노선 및 철도차량의 서비스수준 평가 지표를 개발하고 이를 감안한 철도노선 및 철도차량의 관리방안을 제시하였다. 먼저 철도

노선의 평가를 위한 핵심지표를 열차지연으로 정의하고 관련 국내의 선행연구를 검토하였다. 그 결과 열차운행자료에 기반 한 모형정산 및 열차운행회수, 차종별 열차운행속도, 정량화된 열차지연이 모두 제시된 외국(스웨덴)의 연구결과(Lindfeldt, 2015)를 활용하였다. 이를 바탕으로 총 지연시간과 노선이용률 간 관계를 활용하여 철도노선의 서비스수준(LOS) 등급을 A부터 F까지 6단계로 구분하여 제안하였다.

둘째, 철도차량의 용량은 최대 좌석수와 최대 입석수의 합으로 정의하였으며, KTX 18량 기준으로 최대좌석 수를 산정하고 최대 입석 수 산정을 위하여 “환승센터 및 복합환승센터 설계 및 배치기준”에서 제시한 서비스수준을 준용하였다.

이를 통하여 철도차량의 서비스수준 지표는 좌석정원인 931명을 LOS “D”로 정의하고 A는 좌석의 50%, B는 좌석의 70%, C는 좌석의 90%, D-F는 최대 좌석 수에 입석승차율을 감안하여 A부터 F까지 6단계로 제안하였다.

마지막으로 본 논문에서 제안한 철도노선 및 철도차량의 서비스수준 지표를 활용하여 장래 인구증가 및 환경변화에 따라 철도이용수요가 증가할 경우 정부에서 정한 목표 서비스수준을 유지할 수 있도록 철도노선과 철도차량을 관리하는 방안을 제시하였다.

6.2 향후연구과제

본 논문에서는 철도노선 및 철도차량의 서비스수준 지표를 개발하고 장래 적정 서비스 수준을 유지하기 위한 방안을 제시하였으나, 국내 다양한 철도환경에 대한 자료 구득이 어려워 아직 고속철도에만 적용 가능한 한계점이 있다. 현재 고속철도, 일반철도, 도시철도 등 다양하게 존재하고 운영되고 있는 바, 향후에는 도시철도, 일반철도 등 다양한 분야에 적용 가능한 연구가 지속되어야 한다. 마지막으로 이러한 지표를 활용하여 다양한 철도 환경에서 이용 및 활용 상태를 진단하고 서비스 수준 향상을 위한 투자계획, 운영계획의 수립이 가능하기를 기대한다.

감사의글

이 연구는 서울과학기술대학교 산학협력단 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Gibson S., Cooper G., Ball B. (2002) "The evolution of capacity charges on the UK rail network." *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 36, No. 2, pp. 341-354.
- Kim, H., Kim, Y.G. (2006) *Development of Methods for Capacity Management of Inter-regional Railway*, The Korea Transport Institute (in Korean).
- Lindfeldt, A. (2015) *Railway capacity analysis: methods for simulation and evaluation of timetables, delays and infrastructure*. TRITA-TSC-PHD (15-002).
- Marlot, G. (2013), "Rail congestion in the French network," ARAF Conference.