

경전철 노선의 서비스가용도 목표값 설정을 위한 정량적 예측모델에 관한 연구

A Study on the Quantitative Prediction Model for Setting the Target Value of Service Availability for a LRT Line

이창형¹ · 이종우^{1†}

Chang Hyung Lee · Jongwoo Lee

Abstract The Service Availability (SA) in the viewpoint of passenger is used as the key performance indicator (KPI) of quality of service in Light Rail Transit (LRT) Public-Private Partnerships projects. But there are many disputes on the target value of SA because of the lack of experience in SA. The target value of SA should be set at an early stage of the project to be specified on the system specifications and operation plan. Therefore, this paper developed the quantitative prediction model of SA to set the reasonably achievable target value of SA at an early stage of the LRT project. Also this paper analyzed the relationship and differentiation of SA and Train Punctuality (TP) that is mostly compared with SA.

Keywords : Service availability, Quality of service, LRT , Train punctuality

초 록 경전철 민자사업에서는 서비스 품질에 대한 핵심성과지표(KPI)로서 승객관점에서의 서비스가용도가 사용된다. 그러나 국내 경험이 부족한 서비스가용도는 목표 값 설정 시 많은 논쟁이 발생되어 왔다. 서비스가용도 목표값은 시스템 사양서 및 운전운영계획에 반영하기 위하여 프로젝트 초기단계에 설정되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 경전철 프로젝트 초기단계에서 합리적으로 달성 가능한 서비스가용도 목표 값을 설정하기 위하여 서비스가용도를 정량적으로 예측할 수 있는 예측모델을 개발하였다. 또한 서비스가용도 목표 값 설정 시 가장 많이 비교되는 열차 정시성을 이론적으로 모델링하여 서비스 가용도와 열차정시성과의 관계와 차이점을 분석하였다.

주요어 : 경전철, 서비스품질, 서비스가용도, 열차정시성

1. 서 론

경전철 민자사업은 사업시행자를 중심으로 건설과 분리되어 운영하며, 건설기간 공급되는 시스템 품질과 위탁 운영업체의 운영품질이 경전철을 이용하는 승객에 의하여 서비스의 품질이 평가된다. 이러한 경전철 민자사업은 승객관점에서의 서비스 품질지표로서 서비스가용도를 도입하고 있다 [1-3]. 이러한 서비스가용도는 일반적으로 알려지는 열차정시성과는 구별된다.

열차정시성은 철도에서 일반적으로 가장 널리 사용되고 있는 품질지표이며 운영자의 입장에서 체감하는 지연시간을 측정한다고 할 수 있다.

반면 서비스가용도는 승객의 입장에서 체감하는 지연시간을 측정하며 시스템 공급자가 납품한 시스템 품질과 운영자의 고장복구 능력의 운영 품질을 구분하여 평가할 수 있는 지표이다.

경전철 민자사업은 일반적으로 건설계약과 운영 및 유지보수(O&M) 계약이 분리되고, 운영 및 유지보수는 별도의 전문 운영업체에 위탁한다. 위탁 운영업체는 매달 외주운영비를 지급하기 위하여 지급조건이 필요하며, 이러한 지급조건으로 서비스 품질지표를 도입하여 서비스 수준 달성여부를 판단하여 외주운영비를 지급할 수 있다.

따라서 서비스 품질지표는 경전철을 이용하는 승객의 교통서비스 요구조건을 만족하기 위하여 운영자의 훈련 및 숙련도 등의 운영품질수준이 반영될 수 있는 지표여야 한다. 운영계약에 반영되는 핵심 서비스 품질지표로서 서비스가용도가 적용되며, 서비스가용도 성과에 따라 패널티 및 인센티브가 적용될 수 있다[1].

그러나 계약적으로 중요한 서비스가용도 목표 값에 대하여 사업시행자, 운영자, 시스템 공급자의 이해관계자간 상호 합의가 필요하나, 서비스가용도 실적이 국내에 전무하며 국내 실적이 많은 열차정시성과의 혼선으로 인하여 많은 논쟁이 발생하였다. 일반적으로 사업시행자는 높은 서비스가용도 목표값을 요구하나 운영자와 시스템공급자는 보증할 수 있는 낮은 목표치를 제시한다. 또한 서비스가용도 목표 값은 프로젝트 초기단계에서 결정되어야만, 신규 노선의 서비

[†]교신저자 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과
E-mail : saganlee@seoultech.ac.kr

¹서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과

스가용도 목표값을 달성하기 위하여 시스템 별로 가용도 목표값이 할당되어 시스템 사양서에 반영되고 또한 운전운영 계획에도 반영될 수 있다.

따라서 본 논문에서는 승객관점에서의 서비스 품질지표로서 서비스가용도에 적용되는 승객관점에서의 서비스고장시간 산정방안을 제시하며, 프로젝트 초기단계에서 경전철 서비스가용도를 정량적으로 예측하는 예측모델을 개발하여 사업시행자가 서비스가용도 목표값을 합리적으로 설정하는 방법을 제시한다. 또한 가장 많은 혼선을 야기하는 열차정시성을 이론적으로 모델링하여 서비스가용도와 열차정시성의 관계를 분석하여 차이점을 규명하였다.

2. 서비스가용도

2.1 선행연구 요약

서비스가용도에 관한 연구로 김재훈 등은 철도시스템 가용도에 대하여 해외규격, 국내의 발주사양 등을 통해, 가용도 계산방법 등을 비교분석하고[4], 이를 통해 국내 철도시스템에 적용할 가용도 계산방법(안)을 제안하였으며, 하천수 등은 국내외 철도 서비스 품질의 내용을 비교 검토하고, 경전철시스템의 특성을 파악한 후, 이를 반영한 정량적인 서비스 품질의 척도 및 평가방법을 제안하였다[5]. 또한 서용준 등은 자기부상열차 시스템을 위한 서비스가용도 모델과 메트로 시스템의 서비스 성능을 측정하는 전형적인 RAM 모델에 관한 연구를 수행하였다[6]. 김종운 등은 정시성의 목표값이 운영 요구조건으로 주어진 경우 철도운영자가 운영기간 동안의 패널티 부과 회수를 고려하여 철도시스템의 서비스 신뢰도 목표로 설정할 수 있도록 철도시스템 및 하위시스템의 서비스 고장간 거리에 따라 연간 패널티 부과 확률 및 철도시스템의 운영연수 동안 패널티 부과 회수를 산출하는 절차 및 계산식을 제안하였다[7].

기존 연구는 서비스가용도의 계산식 및 절차를 제시하였으나, 단일 노선 전체의 서비스가용도 목표값을 설정하기 위한 서비스가용도의 정량적 예측모델이 제시되지 않고 있다. 또한 기존 연구에서는 승객, 운영자, 시스템공급자의 관점에 따른 고장시간의 구분 및 승객관점에서의 서비스고장시간 산정방안이 제시되지 않고 있다.

2.2 승객 관점에서의 서비스 품질지표

경전철에 요구되는 핵심 서비스 품질 요구조건은 Table 1과 같이 정시운행이다. 정시운행에 대한 관점은 승객 관점 혹은 운영자 관점에 따라 다르게 판단될 수 있다. 운영자 관점에서는 시발역에서 종착역까지의 열차운행에 대한 정시운행 기준이지만, 승객 관점에서는 승객 개인의 통행을 위한 출발역에서 도착역까지의 열차운행에 대한 정시운행 기준이다. 이러한 승객 개인의 출발역과 도착역은 열차운행의 시발역과 종착역과는 많은 차이가 날 수 있다.

Table 1 Viewpoint for LRT Quality of Service (QoS)

관점 구분	QoS	불량	불량시 조치 예
승객	정시운행	운영지연, 운행취소	대체 교통수단 이용
운영자	정시운행	운영지연	빠른 고장복구조치
		운행취소	예비편성 투입
시스템 공급자	RAM	고장	이중계 구성

경전철을 이용하는 승객의 통행시간은 승강장에서의 대기시간과 열차 탑승 후 차내 대기시간에 많은 영향을 받는다. 승객의 승강장 대기시간은 평균적으로 열차의 운전시격(배차간격)에 의해서 결정되며, 차내 대기시간은 열차의 표정 속도에 의해서 결정된다.

운행취소로 인하여 승객의 승강장 대기시간이 증가되며, 운행지연으로 인하여 승객의 차내 대기시간이 증가한다. 따라서 운행취소 및 운행지연에 따른 통행시간의 증가는 타 교통수단대비 경쟁력을 상실하여 교통수요의 감소 및 운임수익의 감소로 이어질 수 있다.

2.3 서비스 고장시간의 구분 및 고장의 범주

무인운전 경전철의 서비스 고장시간(MTTRS: Mean Time To Restore Service)은 아래 Fig. 1과 같이 구분될 수 있다. ①감지시간은 관제실의 운영요원이 고장을 감지하여 반응하기까지의 시간으로 유지보수요원의 현장출동 지시 등의 소요시간이다. ②이동시간은 유지보수요원이 고장이 발생한 위치까지 접근하는데 소요되는 시간이다. ③MTTR(Mean Time

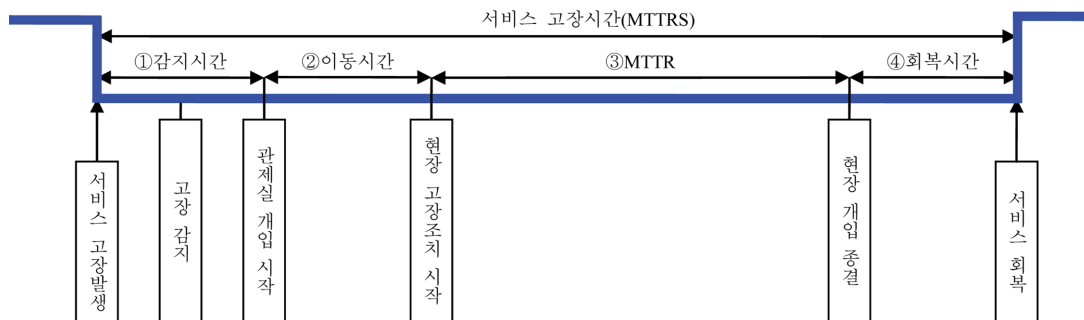


Fig. 1 The structure of service down time (MTTRS) after service failure

To Repair)은 유지보수요원에 의하여 고장조치를 완료하고 서비스 준비될 때까지 소요되는 시간이다. ④회복시간은 서비스 재개를 위하여 관제실의 운영요원이 시스템을 재가동 하는데 소요되는 시간이다.

승객이 체감하는 고장시간은 MTTRS이지만, 고장에 대한 책임은 운영자와 시스템 공급자로 구분된다. 시스템 공급자는 ③MTTR을 책임지지만 운영자는 ③MTTR을 제외한 나머지 시간(MTTRS - MTTR = ①감지시간 + ②이동시간 + ④회복시간)에 대한 책임을 가진다.

서비스 고장 시 지연시간은 승객이 느끼거나 인식하는 지연시간을 의미하며, 실제 발생한 서비스 고장횟수 산정 시 지연시간 별 고장등급을 부여하고 적절한 허용범위의 기준 시간을 초과하는 경우를 서비스 고장이라 정의한다. 서비스 고장등급의 예는 Table 2와 같다[2].

Table 2 Service failure category

고장등급	지연시간	고장조치	서비스고장 판별
무시 가능한 고장	1분 미만	관제실 원격제어	정시운행
경미한 고장	1분 이상 3분 미만	관제실 원격제어 및 운영요원 투입	정시운행
중대한 고장	3분 이상 30분 미만	유지보수요원 투입 유지보수	서비스고장
심각한 고장	30분 이상	필요시 구원운전 실시	서비스고장

무시 가능한 고장 및 경미한 고장은 관제실의 원격제어 및 운영요원(차량 탑승 또는 역사인원) 등의 즉각적인 개입으로 해소되는 것이 일반적이므로 3분 미만의 지연시간을 발생키는 고장은 정시운행으로 판단하나, 중대하거나 심각한 고장인 3분 이상의 지연시간을 발생시키는 고장은 운행지연 및 서비스 고장으로 판단할 수 있다.

2.4 서비스가용도 정의 및 측정방법

국내외 철도시스템에서 적용되는 가용도는 다양한 계산방법들이 적용될 수 있다[1-6]. 본 논문에서 사용되는 서비스 가용도(Service Availability: SA)는 식(1)과 같이 정의되며, 국내 부산-김해 경전철, 용인 경전철 및 우이-신설 경전철에서 채택된 식이다[1-3].

서비스가용도는 매 일별을 기준으로 계산되며, 기본 예정 운영시간(T_S) 대비 실제 운영시간(T_A)의 비율을 근거로 한다. 운영중지시간(T_D)은 각 고장 별 허용시간을 초과하는 서비스 고장시간의 합계로 정의된다. 매 월별로 평균 되어지는 월별 서비스가용도 혹은 연간 서비스가용도는 운영자의 성과지표로 활용될 수 있다.

$$SA = \frac{T_A}{T_S} = \frac{T_S - T_D}{T_S} = 1 - \frac{T_D}{T_S} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_{Service\ Failure}} DT_i}{T_S} \quad (1)$$

여기서,

$$T_D = \sum_{i=1}^{N_{Service\ Failure}} DT_i \quad (2)$$

i번째 서비스 고장의 서비스 고장시간(DT_i)은 정시운행의 허용범위를 초과하는 운행지연이 발생하는 서비스 고장시의 지연시간으로 정의되며, 노선 별 특성에 따라 다양한 형태의 허용범위가 주어질 수 있다.

- 서비스 고장시간 산정방법

서비스 고장시간의 산정은 승객, 운영자, 시스템 공급자의 관점에 따라 다양하게 정의될 수 있다. 본 논문에서 제시하는 서비스 고장시간은 승객의 관점에서 체감하는 지연시간으로 산정한다.

서비스 고장시간은 고장으로 인하여 본선에 운행중인 모든 지연열차의 인접역까지 계획된 도착시간과 실제 도착시간의 차이인 지연시간을 측정하여 이들 중 허용시간(θ)를 초과한 최대 지연시간으로 식(3)과 같이 산정한다.

$$DT_i = \max(DT_{i1}, \dots, DT_{ij}, \dots, DT_{in}), \quad DT_i > \theta \quad (3)$$

여기서,

$$DT_{ij} = j^{th} \text{ train's delay time at } i^{th} \text{ service failure}$$

$n = \text{the number of train running in the mainline}$

고장 시 고장열차의 지연시간보다 운영미숙 등의 사유로 후속열차의 지연시간이 큰 경우가 발생할 수 있다. 따라서 고장으로 인하여 노선 전체에서 가장 큰 지연시간을 체감하는 승객관점으로 지연시간을 산정한다. 일반적으로 일반철도 등에서 채택되는 종착역 도착 기준의 5분 이내 지연시간의 기준과는 차별화 된다.

이는 일반철도에서는 채택되는 운영자 관점에서 측정되는 종착역 정시성 개념을 경전철 민자사업에서는 승객 관점에서 측정되는 역별 정시성 개념으로 전환하여 승객 서비스 품질을 향상하고자 함이다. 또한 회복운전을 통한 운영자의 만회노력에 따른 지연시간 감소효과를 배제하여 운영자와 시스템 공급자와의 책임소재를 명확하게 할 수 있는 장점이 있다.

2.5 열차정시성과 열차투입도

- 열차정시성(Train Punctuality: TP)

열차정시성(TP)은 실제 투입되는 열차의 운행 횟수 대비 정시운행 횟수의 비율로 정의되며, 식(4)와 같다[6]. 열차정시성 계산시 운행취소 된 운행 횟수는 제외한다. 식(5)의 열차비정시성(Train unPunctuality: TuP)는 열차정시성의 불량지표로 측정되고 관리된다.

$$TP = \frac{N_{On-time\ Trip}}{N_{Actual\ Trip}} = 1 - \frac{N_{Delayed\ Trip}}{N_{Actual\ Trip}} = 1 - TuP \quad (4)$$

여기서,

$$TuP = \frac{N_{Delayed Trip}}{N_{Actual Trip}} \quad (5)$$

열차정시성은 운행횟수의 비율로 표현되지만 서비스가용도는 운영시간의 비율로 정의되는 차이점이 있다.

- 열차투입도(Train Delivery: TD)

열차투입도는 계획된 열차운행계획 대비 실제 운행에 투입되는 열차의 운행횟수의 비율로 정의되며 식(6)과 같다.

$$TD = \frac{N_{Actual Trip}}{N_{Scheduled Trip}} = 1 - \frac{N_{Cancelled Trip}}{N_{Scheduled Trip}} = 1 - TuD \quad (6)$$

여기서,

$$TuD = \frac{N_{Cancelled Trip}}{N_{Scheduled Trip}} \quad (7)$$

식(7)의 열차비투입도(Train unDelivery: TuD)는 열차투입도(TD)의 불량지표로 측정되고 관리된다. 열차비투입도(TuD)는 운행취소율이 많이 알려져 있다.

2.6 서비스가용도 모델링 및 열차정시성과의 관계식

SA는 식(1)로부터 식(12)의 평균지연시간(DT_{avg}) 및 식(13)의 평균시격(HW_{avg})을 이용하여 아래의 식(8)과 같이 모델링 할 수 있으며, 또한 아래의 식(11)와 같이 SA와 TP와의 관계를 유도할 수 있다.

$$SA = 1 - \frac{DT_{avg} \times N_{Delayed Trip}}{HW_{avg} \times N_{Scheduled Trip}} \quad (8)$$

$$= 1 - \left(\frac{DT_{avg}}{HW_{avg}} \right) \times \left(\frac{N_{Delayed Trip}}{N_{Actual Trip}} \right) \times \left(\frac{N_{Actual Trip}}{N_{Scheduled Trip}} \right) \quad (9)$$

$$= 1 - \alpha \times TuP \times TD \quad (10)$$

$$= 1 - \alpha \times TD + \alpha \times TD \times TP \quad (11)$$

여기서,

$$DT_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{Service Failure}} DT_i}{N_{Delayed Trip}} \quad (12)$$

$$HW_{avg} = \frac{T_s}{N_{Scheduled Trip}} \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{DT_{avg}}{HW_{avg}} \quad (14)$$

식(10)로부터 SA는 TuP, α 와 TD 파라미터의 함수로서 식(4)에 나타나 있는 TP와는 다르다는 것을 알 수 있다. 식(10)로부터 SA는 본선에 투입된 열차의 TuP에 α 및 TD 가중치가 적용된 지표임을 알 수 있다.

3. 지수분포를 이용한 서비스가용도 및 열차정시성 모델링

3.1 지연시간 분포

Harris는 개별 정거장에 대한 열차의 지연시간 분포는 지수분포 혹은 q-지수분포로 관측되며 q-지수분포를 사용하면 더욱 정밀하게 정거장 별 열차의 지연시간을 모델링 할 수 있다는 것을 보여주었다[4]. 그리고 지수분포 이외의 분포를 가정하면 요구조건 설정 및 검증이 매우 어렵기 때문에 복잡한 철도시스템의 고장모형으로 지수분포가 널리 사용된다[4,7]. 본 논문에서는 여러 정거장을 가진 단일 노선에 운행 중인 열차들의 지연시간 분포는 지수분포를 따른다고 가정한다. 단일 노선에 대한 지연시간 확률 분포는 Fig. 2에 보여진다.

Fig. 2에서 보여지는 지수분포 확률밀도함수(PDF)는 다음 식(15)과 같이 정규화되어 정의될 수 있다[9]. 어떤 지연고장에 대한 지연시간 DT 는 지수분포 무작위 변수라고 가정한다.

$$f_{DT}(t) = \begin{cases} \lambda \exp(-\lambda t), & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (15)$$

λ 는 지수분포의 속도 매개변수인 양수로서 지연고장의 고장률을 의미한다. λ 의 산정방안에 대해서는 3.4에서 상세히 기술된다.

운행지연 확률 $P[DT > \theta]$ 은 식(15)로부터 다음 식(16)과 같이 정의될 수 있다[9].

$$P[DT > \theta] = \int_{\theta}^{\infty} f_{DT}(t) dt = \int_{\theta}^{\infty} \lambda \exp(-\lambda t) dt = \exp(-\lambda \theta) \quad (16)$$

운행지연 확률 $P[DT > \theta]$ 는 어떤 주어진 무작위적 지연사건이 임의의 지연시간 DT 가 θ 이상일 확률을 보여준다. 0분 지연시간 이상일 확률은 명백하게 1이다.

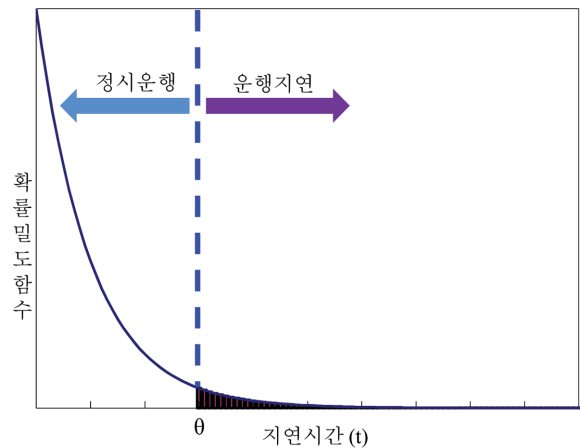


Fig. 2 The probability density function of delay time

정시운행의 허용시간(θ)를 초과하는 운행지연의 평균지연 시간, DT_{avg} 는 다음 식(17)과 같이 유도할 수 있다[9].

$$\begin{aligned}
 DT_{avg} &= E[DT|t > \theta] \\
 &= \int_{\theta}^{\infty} t \times f_{DT|t > \theta}(t) dt \\
 &= \int_{\theta}^{\infty} t \times \frac{f_{DT}(t)}{P[DT > \theta]} dt \\
 &= \int_{\theta}^{\infty} t \times \lambda \exp[-\lambda(t - \theta)] dt \\
 &= \theta + \frac{1}{\lambda}
 \end{aligned} \tag{17}$$

지연시간 밀도함수, $f_{DT|t > \theta}(t)$ 는 조건부 확률밀도함수로서 $P[A|B] = P[A]P[B]$ 의 조건부 확률 공식을 따른다. 특히 $f_{DT|t > \theta}(t) = f_{DT}(t - \theta)$ 이다. 이러한 결과의 해석은 θ 를 초과하는 지연고장의 지연시간은 θ 에 지수분포시간이 더해짐을 알 수 있다.

3.2 지연승수(α)

식(17)을 식(14)에 대입하면 지연승수(α)를 $\theta, HW_{avg}, \lambda$ 를 이용하는 식(18)과 같이 유도할 수 있다.

$$\alpha = \frac{DT_{avg}}{HW_{avg}} = \frac{1}{HW_{avg}} \left(\theta + \frac{1}{\lambda} \right) = \frac{\theta}{HW_{avg}} + \frac{1}{\lambda \times HW_{avg}} \tag{18}$$

식(18)로부터 지연승수(α)를 구하기 위하여, 열차시각표를 이용하여 평균 운전시격(HW_{avg})을 산출한 후 허용시간(θ)을 설정하여야 한다.

3.3 열차정시성 및 서비스가용도 모델

식(5)로부터 식(16)의 허용시간(θ) 이상의 운행지연 확률 $P[DT > \theta]$ 를 이용하여 TuP는 식(19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$TuP = \frac{N_{Delayed Trip}}{N_{Actual Trip}} = \frac{N_{Actual Trip} \times P[DT > \theta]}{N_{Actual Trip}} = \exp(-\lambda\theta) \tag{19}$$

여기서,

$$N_{Delayed Trip} = N_{Actual Trip} \times P[DT > \theta] \tag{20}$$

식(19)를 사용하여 TP는 식(4)로부터 다음 식(21)과 같이 표현될 수 있다.

$$TP = 1 - \exp(-\lambda\theta) \tag{21}$$

식(21)으로부터 TP는 운전시격과 무관하며, 허용시간(θ)과 지수 비례하여 증가함을 알 수 있다.

식(17), 식(18)을 사용하여 SA는 식(10)으로부터 다음 식(22)과 같이 표현될 수 있다.

$$SA = 1 - \frac{1}{HW_{avg}} \left(\theta + \frac{1}{\lambda} \right) \times \exp(-\lambda\theta) \times TD \tag{22}$$

식(22)로부터 허용시간(θ), 평균시격(HW_{avg}), 고장률(λ) 그리고 열차투입도(TD)를 이용하여 SA를 정량적으로 예측할 수 있다.

SA를 정량적으로 예측하기 위하여 사용되는 각 입력 파라미터 산정방안에 대하여 3.4에서 상세히 기술되며, 4장에서는 각 입력 파라미터에 대한 SA와 TP의 민감도 및 차이점을 비교 분석하였다.

3.4 서비스가용도 예측모델에 사용되는 입력 파라미터 산정방안

- 허용시간(θ) 산정

허용시간(θ)은 시업시행자가 노선의 운전시격 특성 및 타 노선을 참고로 설정한다.

- 평균시격(HW_{avg}) 산정

노선의 평균시격(HW_{avg})은 열차시각표를 이용하여 쉽게 산출된다.

- 열차투입도(TD) 산정

열차투입도(TD)는 철도 운영회사에서 많이 사용되는 철도 서비스 품질지표의 하나이며, 대부분의 운영회사는 충분한 예비열차를 확보하여 TD > 99% 되도록 관리하고 있다.

열차투입도(TD)는 유사한 시스템의 과거실적 데이터나 정인수 등이 제시한 서비스 시작 시점에 철도 차량을 서비스에 투입 가능한 확률인 차량 서비스 준비율 모델식을 활용하여 추정한다[10].

- 고장률(λ) 산정

노선 전체의 고장률(λ)은 가장 많은 실적 데이터를 가지고 있는 TP와 허용시간(θ)의 데이터로부터 식(21)을 이용하여 다음 식(23)과 같이 고장률(λ)을 구한다[11].

$$\lambda = \frac{\ln(1 - TP)}{\theta} \tag{23}$$

식(23)으로부터 통계적으로 가치가 있는 고장률(λ) 값을 확보하기 위하여 초기고장 단계와 안정화 단계로 구분하고 특성이 비슷한 노선별로 분류하여 통계적으로 처리하면 의미 있는 고장률(λ)을 산정할 수 있다고 판단되나 향후 추가 연구가 요구된다.

사업시행자와 운영자간 합의할 수 있는 고장률을 제공하기 위하여 각 노선별 고장률(λ)을 조사하여 비슷한 노선별로 분류하여 대외적으로 권장하는 고장률(λ)을 산정하는 방법도 있다.

4. 서비스가용도 및 열차정시성 분석

4.1 허용시간(θ) 변화에 대한 열차정시성(TP) 분석

식(21)로부터 θ 변화에 따른 TP의 λ 민감도가 Fig. 3에 보

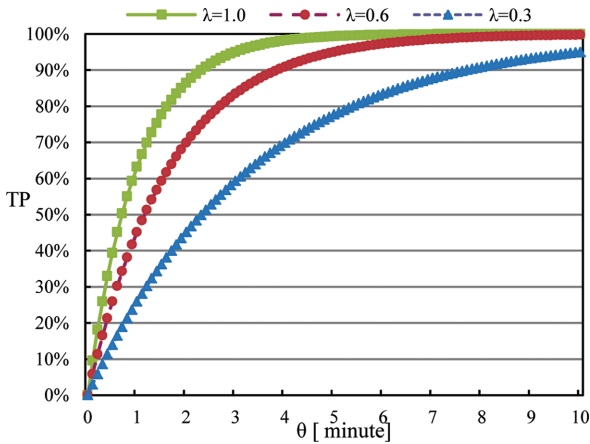


Fig. 3 A plot of TP against θ with parameter values, $\lambda = 1.0, 0.6, 0.3$

여진다. TP는 θ 가 증가함에 따라 증가하나 λ 에 따라 민감도가 달라짐을 알 수 있다.

Fig. 3으로부터 TP = 95%를 달성하기 위하여 $\lambda = 0.3$ 일 경우 10분, $\lambda = 0.6$ 일 경우 5분, $\lambda = 1.0$ 일 경우 3분의 허용시간(θ)이 필요하다. 즉, 동일한 TP값을 달성하기 위하여 노선의 λ 특성에 따라 다른 θ 설정이 필요하다.

4.2 평균시격(HW_{avg}) 변화에 대한 열차정시성 (TP) 및 서비스가용도(SA) 분석

$\lambda = 1.0, \theta = 3$ 분, $TD = 1$ 을 가정할 경우, HW_{avg} 에 따라서 α, TP, SA 의 변화가 Table 3에 보여진다.

Table 3로부터 $\alpha = 1$ 인 경우 SA는 TP와 동일한 95%의 값을 가짐을 알 수 있다. Table 3에 대한 추세를 Fig. 4와 같이 표현할 수 있다.

이 Fig. 4로부터 HW_{avg} 가 증가함에 따라 α 는 감소하고 SA는 증가함을 명확히 알 수 있다. 그러나 TP는 HW_{avg} 변화와 무관하게 일정한 값을 가진다. 따라서 TP는 한 노선의 평균시격 등의 특수한 사항을 반영하지 못하는 단점을 가진다. 반면 SA는 노선의 평균시격을 반영하여 적절한 값을 설정할 수 있다.

Table 3 A table showing α, TuP, TP and SA at different average headways

HW_{avg}	α	TuP	TP	SA
2	2	5.0%	95.0%	90.0%
4	1	5.0%	95.0%	95.0%
6	0.67	5.0%	95.0%	96.7%
8	0.5	5.0%	95.0%	97.5%
10	0.4	5.0%	95.0%	98.0%

4.3 지연승수(α) 특성 분석

α 는 식(14)에서 보여지는 평균시격 대비 평균지연시간의 비율이다. 국내 경전철 민자사업에 적용되는 정시운행 허용

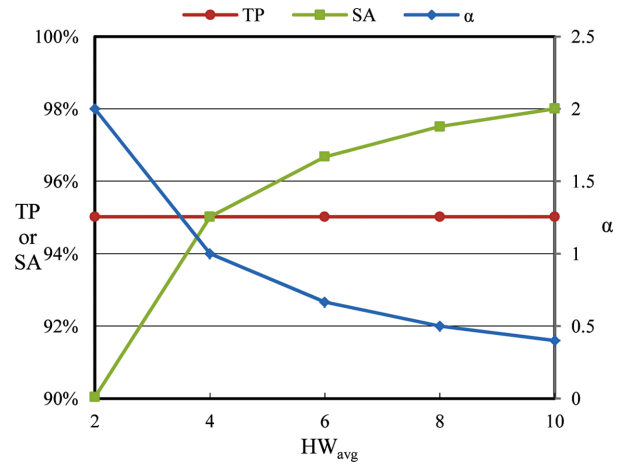


Fig. 4 A plot of TP, SA and α against average headway (HW_{avg})

Table 4 A table showing different delay thresholds (θ) for on-time trip

구분	허용시간(θ)	λ	α
우이-신설 경전철	3 min	1	$4 / HW_{avg}$
부산-김해 경전철	One Headway	1	$1 + 1 / HW_{avg}$
용인 경전철	Two Headway	1	$2 + 1 / HW_{avg}$

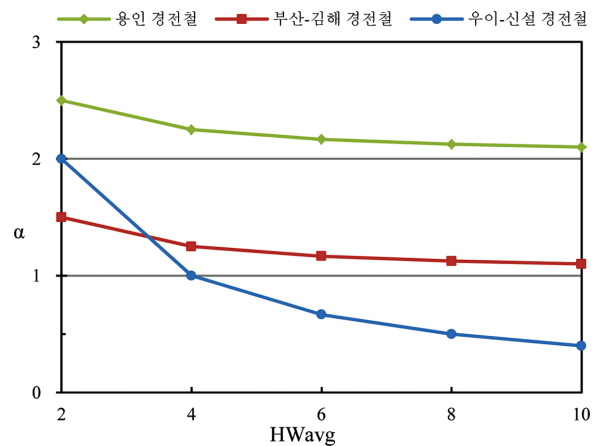


Fig. 5 A plot of α at different θ against average headway (HW_{avg})

시간(θ) 사례를 분석하면 Table 4과 같다[1-3].

일반적으로 철도에서 적용되는 5분의 고정된 정시운행 허용시간이 아니라, 경전철 노선의 특성에 따라 다른 값을 적용하고 있다. 부산-김해 경전철과 용인 경전철의 특이한 점은 허용시간이 운전시격과 연동하여 가변적으로 설정한다는 것이다.

Table 4에 대한 추세를 Fig. 5과 같이 표현된다.

가변형 허용시간인 $\theta = HW$ 로 설정된 부산-김해 경전철 및 $\theta = 2 \times HW$ 로 설정된 용인 경전철은 HW_{avg} 변화에 따른 α 의 민감도가 적으나, 3분의 고정된 허용시간을 가진 우이-신설 경전철은 HW_{avg} 변화에 따라 α 가 민감하게 변한다.

4.4 정시운행 허용시간(θ) 변화에 대한 SA 민감도 분석

$\lambda = 0.6$, $TD = 1$ 을 가정할 경우, 식(21)과 식(22)을 이용한 θ 변화에 따른 TP, SA 민감도가 Fig. 6에 보여진다.

Fig. 6으로부터 허용시간(θ)이 감소함에 따라 SA(3 min HW_{avg})는 큰 폭으로 감소하고 또한 SA(10 min HW_{avg})와 SA(3 min HW_{avg})의 차이는 커지는 추세를 보여준다. 이러한 점은 10분 이하의 정시운행 허용시간 (θ)을 가지는 노선은 SA값의 차이가 0.67% 이상으로 커진다. 5분의 정시운행 허용시간(θ)을 가지는 노선의 경우, 평균 운전시격의 크기에 따라 상당히 큰 7.74%의 SA값의 차이를 가짐을 알 수 있다. 따라서 10분 이하의 운행지연 허용시간(θ)을 가지는 노선에 대한 SA는 허용시간(θ) 및 평균시격(HW_{avg}) 변화에 대하여 상당히 큰 민감도를 가진다.

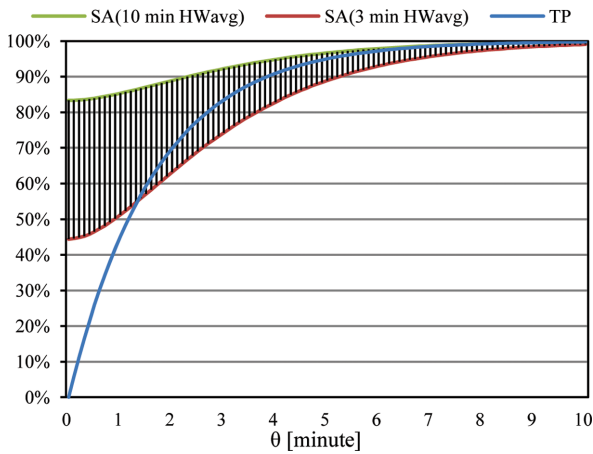


Fig. 6 A plot of TP and SA with parameter values, $\lambda = 0.6$, $TD = 1$ and $HW_{avg} = 3\sim 10$ min.

국내 경전철의 한 사례는 연간 SA 목표값 대비 측정된 SA의 차이 1%당 연간 위탁운영비 총액의 0.1% 그리고 최대 위탁운영비 총액의 1%의 패널티를 적용하고 있다. 따라서 노선의 허용시간(θ) 및 평균시격 (HW_{avg}) 특성을 고려한 정량적 SA 목표값의 설정이 중요함을 알 수 있다.

4.5 TD 변화에 대한 SA 민감도 분석

식(22)로부터 TD가 증가하면 SA는 감소한다. Table 3에 적용된 $\alpha = 1$ 인 사례를 이용하여 TD변화에 대한 SA 변화를 Table 5와 같이 표현할 수 있다.

식(22)로부터 TD는 운행지연 확률인 $\exp(-\lambda\theta)$ 에 가중치를 부여하여 전체적인 고장확률을 감소시킨다. 예를 들면, 한 개 노선에서 20편성의 열차가 운행 중일 경우, 1개 편성의 열차가 고장으로 수리를 위하여 본선에서 차량기지로 회송되면, 19편성의 열차가 운행된다. 19편성의 운행열차는 20편성의 운행열차 대비 고장이 발생할 확률이 적다. 이 경우 열차투입도 TD는 감소하고 SA는 증가한다. 그러나 대부분의 경우 별도의 예비열차를 투입하여 운행취소를 최소화한다. 예비열차를 투입할 경우 TD는 증가하고 SA는 감소한다.

Table 5 SA vs TD

TD	α	TuP	SA
100%	1	5.0%	95.00%
99%	1	5.0%	95.05%
98%	1	5.0%	95.10%

TD의 감소는 SA의 증가를 유발하고 운영 시 별도로 조 작이 가능하므로, TD는 SA와 별도로 관리되어야 한다. TD는 TP와는 별도의 품질지표로서 각 운영회사에서 많이 사용되며, 대부분의 운영회사는 충분한 예비열차를 확보하여 TD가 99% 이상의 높은 값을 가지도록 관리하고 있다.

5. 결 론

열차정시성은 철도에서 일반적으로 가장 널리 사용되고 있는 품질지표이며 운영자의 입장에서 체감하는 지연시간을 측정한다. 반면 서비스가용도는 승객의 입장에서 체감하는 지연시간을 측정하며 시스템 공급자가 납품한 시스템 품질과 운영자의 고장복구 능력의 운영 품질을 구분하여 평가할 수 있는 지표이다. 따라서 서비스가용도는 건설과 운영이 분리되고 운영이 별도의 전문 운영자와의 운영계약이 되는 경전철 민자사업에서 핵심 서비스 품질 지표로서 많이 이용될 수 있다.

그러나 계약적으로 중요한 서비스가용도 목표값에 대하여 사업시행자, 운영자, 시스템공급자의 이해관계자간의 상호 합의가 필요하나, 서비스가용도 실적이 국내에 전무하며 국내 실적이 많은 열차정시성과의 혼선으로 많은 논쟁이 발생하였다. 또한 서비스가용도 목표값은 프로젝트 초기단계에서 결정되어야 신규 노선의 서비스가용도 목표값을 달성하기 위하여 시스템 별로 가용도 목표값이 할당되어 시스템 사양서에 반영되고 또한 운전운영계획에도 반영될 수 있다.

따라서 본 논문에서는 프로젝트 초기단계에서 경전철 서비스가용도를 정량적으로 예측하는 예측모델을 개발하여 서비스가용도 목표값을 합리적으로 설정하는데 기여하고자 하며 또한 가장 많은 혼선을 야기하는 열차정시성을 이론적으로 모델링하여 서비스가용도와 열차정시성의 관계와 차이점을 분석하였다.

본 논문의 개발된 서비스가용도 예측모델은 경전철 민자사업 이외에도 서비스가용도 지표를 도입하고자 하는 신규 노선의 철도 및 도시철도 사업시행자에게도 활용될 수 있다고 판단된다.

참고문헌

- [1] BGL (2010) Busan-Gimhae Light Rail Transit Operation and Maintenance Contract (in Korean).
- [2] UITRANS (2011) Ui-Shinseol Light Rail Transit System Engineering Implementation Plan (in Korean).
- [3] Yong-In LRT (2004) Yong-In Light Rail Construction Project

Construction Contract.

[4] J.H. Kim, J.S. Park, J.W. Kim, W.H. You (2006) A Study on The Availability Calculation Method for RAM System of Railroad Systems, *2006 Autumn Conference & Annual Meeting of The Korean Society for Railway*, pp. 29-33.

[5] C.S. Ha, S.H. Ahn, C.H. Lee (2008) A Study on the Quantitative Quality of Service of the Light Railway Transit System, *2008 Autumn Conference & Annual Meeting of The Korean Society for Railway*, pp. 2058-2064.

[6] Y.J. Seo, H.K. Yang (2008) Service Availability of the Urban Maglev System in Korea, *Maglev 2008*, San Diego, CA, USA.

[7] J.W. Kim, J.S. Park, I.S. Chung (2011) Setting the Service Reliability Target for Meeting the Punctuality Requirement of the Railroad System, *Journal of the Korean Society for Railway*, 14(1), pp. 6-10.

[8] M. Harris (2006) Analysis and modeling of train delay data, MSc Thesis, University of York, UK.

[9] R.D. Yates, D.J. Goodman (2005) Probability and Stochastic Processes - A Friendly Introduction for Electrical and Computer Engineers, 2nd Edition, John Wiley & Sons Inc., NJ, pp. 117-141

[10] I.S. Chung, K.W. Lee, J.W. Kim (2008) Study on Setting the Quantitative RAM Goals for Rolling Stocks, *Journal of the Korean Society for Railway*, 11(4), pp. 390-397.

[11] www.seoulmetro.co.kr.

접수일(2012년 3월 6일), 수정일(2012년 5월 7일),
 게재확정일(2012년 5월 31일)

[부록] 기호 및 약어

Table A1 Notations and Abbreviations Table

Term	Description
DT	delay time
DT _{avg}	average delay time
DT _i	delay time at i th service failure
DT _{ij}	j th train's delay time at i th service failure
HW _{avg}	average headway
i	index of service failure
MTTR	mean time to repair
MTTRS	mean time to restore service
N _{Actual Trip}	number of actual trips
N _{Cancelled Trip}	number of cancelled trips
N _{Delayed Trip}	number of delayed trips
N _{On-time Trip}	number of on-time trips
N _{Scheduled Trip}	number of scheduled trips
N _{Service Failure}	number of service failures
P	probability
PDF	probability density function
QoS	quality of service
RAM	Reliability, Availability, Maintainability
SA	service availability
t	time
T _A	actual operating time in the observation period
T _D	delayed time in the observation period
T _S	scheduled operating time in the observation period
TD	train delivery
TP	train punctuality
TuD	train undelivery
TuP	train unpunctuality
α	delay multiplier (=average delay time per average headway)
θ	threshold of on-time trip
λ	failure rate of a line