

무인 경량전철 가용도 산정 및 검증에 관한 연구

권상돈* · 송보영** · 이희성***†

A Study on the Estimation and Verification of the Availability of the Unmanned Light Railway

Sang Don Kwon* · Bo Young Song** · Hi Sung Lee***†

†Corresponding Author

Hi Sung Lee

Tel : +010-3261-0420

E-mail : hslee@seoultech.ac.kr

Received : November 15, 2018

Revised : December 17, 2018

Accepted : February 14, 2019

Copyright©2019 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Abstract : Unattended Train operation(UTO)¹⁾ requires higher safety target than other systems, since all train operations are automatic. The system provider to deliver without accident or failure, and the operator to transport passengers without accident by putting all trains supplied, including them, into service. Safety rates without such failures can be represented as indicators of RAMS, among which availability is continuously controllable to achieve the target, with a clear target. Availability is often required by the licensee from the initial stage of the project to demonstrate that the request for proposal (RFP) is usually specified and to maintain separate availability targets at the operational stage. In particular, unlike unmanned operation light rail in complex systems, simple formulas are often presented to facilitate verification at each stage. This paper presents this method of usability calculation in an integrated manner at all levels and analyzes the existing usability values to ensure reliability of the availability formula for integrated use in unmanned light rail systems.

Key Words : LRT, UTO, availability, RAMS, safety

1. 서론

경량전철 시스템은 고가의 비용이 소요되는 지하철(또는 도시철도)에 비해 같은 노선 길이 대비 70%까지 비용 감소가 가능한 시스템으로서, 비용 절감의 대부분은 시스템의 통합, 자동화 기능 향상 및 인력 저감을 통해 실현하고 있다. 이와 같은 이유로 최근 건설되고 운영되는 대부분의 경량전철 시스템은 운전자가 탑승하지 않는 무인운전방식(Unattended Train Operation, UTO)으로서 무인운전의 신뢰도가 가장 중요한 척도가 되고 있다. 신뢰도 척도는 RAMS의 수치로 나타낼 수가 있으며, 철도시스템에 적합한 IEC 62278²⁾을 포함하여 전기 전자 등의 제어 시스템에 대한 기능 안전성을 설명하는 IEC 61508, 철도 신호 및 통신시스템의 안전성을 설명하는 IEC 62425³⁾가 있다. 신뢰도 및 가용도의 기준 제시에는 다른 산업에서 적용하는 신뢰성 척

도를 철도시스템에 적용하여 평가하는 연구⁴⁾를 비롯하여 각 장치별 고장률을 비교 분석하여 신뢰도 및 가용도 기준을 제시하였다⁵⁾. 또한 박문규 등⁶⁾은 위험기반 RAMS 평가에 관한 연구에서 철도차량의 운영 프로파일에 의해 가용도를 할당하였다. 이러한 기존 시스템에 대한 RAMS의 정량화와 더불어 신규 노선의 경우 최소 비용을 투입하여 최대의 효과를 얻기 위해 열차의 소요편성수를 최소화 하여 운영에 투입하고 있으며(예비열차 포함), 예방정비, 일상 및 월상 점검 등을 통해 모든 열차를 100% 운행 가능하게 하는 것을 목표로 하고 있고 IEC 62267 RAMS에 영향을 미치는 3가지 요소인 시스템의 조건, 동작 조건, 유지보수 조건을 고려하여 요구사항서(Request For Proposal, RFP)에 제시하고 있다. 각 시스템의 우발적 또는 조직적 고장요인, 인적 또는 외부요인에 의한 환경 조건, 예방정비 및 교정 등의 유지보수 조건을 고려하여 무인운전 방식의

*서울과학기술대학교 철도차량시스템공학과 박사과정 (Department of Rolling Stock System, Seoul National University of Science & Technology)

**국토교통부 철도운영안전과 철도안전감독관 (Ministry of Land Infrastructure and Transport)

***서울과학기술대학교 철도차량시스템공학과 교수 (Department of Rolling Stock System, Seoul National University of Science & Technology)

경량전철 시스템에서는 열차의 고장 정의, 고장 발생 시 최소의 수리시간 등의 신뢰도(Reliability)와 함께 보유하고 있는 열차의 운용 가능성 척도인 가용도(Availability)가 중요한 운영목표가 되고 있으며, 가용도를 제시하는 노선에서는 RFP에서는 가용도를 정의하고 준공 후 일정 기간 동안 가용도를 달성하도록 요구하고 있다. 요구사항서 (Request For Proposal, RFP)에서 정의하는 가용도는 사업자에게 주어지는 목표값으로서 사업자는 제안하는 목표값을 일정 기간 동안 달성하기 위해 모든 단계에서 운용의 효율성을 높이는 방안으로 설계 및 제작을 진행하고 있다. 하지만 사업자에게 주어지는 가용도는 준공 후 발생하는 고장에 대한 행정 처리 시간, 교정 정비 시간 등이 누락되어 제시될 수밖에 없는 것으로서 가용도를 목표값으로 제시하기 위해서는 운영 단계에서 별도로 제시하지 않으면 단순한 투입 열차 대비 고장열차에 대한 비율밖에 제시할 수 없다. 본 연구에서는 이러한 이원화 될 수밖에 없는 가용도 사례를 조사하고 각 가용도 별로 장단점을 분석하고 향후 건설 및 운영기간 중에 사용이 가능한 가용도에 대하여 제시한다.

2. 본론

2.1 IEC 62278 철도 RAMS에서의 가용도

철도시스템에서 사용하고 있는 가용도는 IEC62278에 나타나 있는 가용도 파라메타를 참조한다.

$$\Rightarrow \text{Availability (A)} = \frac{\text{MUT}}{\text{MUT} + \text{MDT}} \quad (0 < A < 1) \quad \begin{matrix} \text{MUT : Average of Uptime} \\ \text{MDT : Average of Downtime} \end{matrix}$$

Fig. 1. General availability calculation.

기본적인 가용도 산정식은 평균 동작시간(MUT)과 평균 휴지시간 (평균 비가동시간, MDT)과의 관계로 나타내며 Fig. 1과 같다. 이 식에서 MUT와 MDT값을 어떠한 파라메타로 정의하는 것에 따라 IEC 62278 부속서 C3 가용성 파라메타에 의한다.

철도시스템에서 적용하고 있는 가용도는 대부분 고유가용도 (Inherent Availability)이다. 고유가용도는 고장과 고장사이의 시간 MTBF(Mean Time Between Failure)와 고장 수리시간 MTTR(Mean Time To Restore)⁷⁾으로 정의가 되며, 시스템의 MTBF를 명확히 산정하면 할수록 고유가용도의 정확성은 더욱 높아지는 것이 특징이다. 다만 고유가용도는 고장이 발생했을 경우 고장수리 시간만 정의하고 가용성 산식에 입력하기 때문에 실제 운영 시 발생하는 고장에 대한 교정시간, 행정시간 등

의 수리를 위해 발생하는 시간에 대해서는 전혀 고려하지 않는 것이 특징이다. 따라서 고유가용성은 건설사업을 위해 발주처에서 제시를 하거나 적정한 가용도를 요구할 때 많이 적용하는 가용도 파라메타가 된다.

두 번째 철도시스템에서 적용하는 파라메타는 달성 가용도(Achieved Availability)가 있다. 달성가용도는 IEC62278 가용도 식에서 MUT 대신 MTBM(Mean Time Between Maintenance)을 적용하고 MDT에 MTTMa (Mean Time To Maintenance)를 사용하고 있으며, 교정시간을 포함시킨 것이 가장 큰 특징이다. 일반적으로 고유가용도는 사업 시작을 위한 RFP 내에 가용도를 요구할 때 많이 사용하고 있으며 (실제 사업 진행 중 시운전 단계 및 운영 초기 일정기간 달성을 위한 계약적 항목으로 제시된다.) 이러한 조건을 보완하기 위해 달성가용도를 적용하는 사례가 점차 증가하고 있다.

세 번째로 철도시스템에서 적용하는 파라메타는 운영가용도(Operational Availability)가 있다. 운영 가용도는 건설 사업을 종료하고 운영조직이 인수하여 실제 운영 다이어를 적용하면서 산정하는 가용도 방식으로서 고장 발생 시 부품 조달 및 행정시간 전체를 포함한 것이 가장 큰 특징이 된다. 따라서 운영 가용도는 사고 발생 시 운영조직의 긴밀한 대응시간에 따라 가용도 등급이 결정되므로 실제 운영조직의 유기적 활동을 중요한 인자로 적용하고 있다. 실제 건설단계 또는 사업초기 단계에서 행정지연시간을 명확히 정의할 수 없고 운영 가용도를 검증하기 위해서는 장기간 운영을 하면서 확인 및 검증의 단계를 거쳐야 하므로 건설사업자 보다는 대부분 운영조직 내에서 적용하는 것이 특징이다.

다음의 철도시스템에서 적용하는 가용도는 함대 가용도(Fleet Availability)이다. 함대가용도는 전체 차량 편성수 대비 운영가능한 차량 편성수의 비율로 나타내고 있다. 함대가용도의 특징은 가용도를 단순하게 운용하는 열차의 수량으로 비교한 것으로서 언제 어느 시간에서나 단순 현황 파악이 용이하다. 다만 도시철도와 같이 입출고 시간이 각각 다를 경우 본선 상에 열차가 계속적으로 변하게 되므로 가용도값을 실시간으로 모니터링 해야 하며, 투입하지 못하는 열차를 단순히 고장열차로 정의 한 것이므로 많이 사용하고 있지는 않고 있다.

마지막으로 IEC62278에서 사용하는 철도시스템의 가용도 파라메타는 계획 고수(Schedule Adherence)가 있다. 계획 고수는 사전에 지정된 열차 운영 다이어에 맞춰 스케줄에 의해 운행되는 열차 대비 스케줄대로 운행하지 못하는 열차의 비율로 정의된다. 계획 고수는 열차 서비스를 확인할 때 적용하는 것이 가장 큰 장

Table 1. Application examples of availability by route

Route	Target	Calculation
Yongin ever line	Service Availability SA ≥ 99%	$SA = \frac{MTBSAF}{MTBSAF + MTTR}$
Busan-gimhae light rail Transit	Service Availability SA ≥ 98%	$SA = \frac{MTBFs - MTTRs}{MTBFs}$
Copenhagen light rail transit	Service Availability SA ≥ 98%	$SA = \frac{MTBFs - MTTRs}{MTBFs}$
LRT sillim line	Inherent Availability Ai ≥ 99%	$SA = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$
Maglev of incheon airport ⁸⁾	Inherent Availability Ai ≥ 98%	$Ai = \frac{MTBSAF}{MTBSAF + MTTR}$
Incheon airport shuttle train	Inherent Availability Ai ≥ 99.5%	$Ai = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$

점이 된다. 다만 스케줄을 준수하지 못하는 열차에 대해서 건설사업자와 운영사업자 사이에 책임이 명확히 나타나지 않으므로 가용도가 저하될 경우 사업자 사이에 많은 논란이 발생한다.

각 가용도의 상관관계를 보면 고유가용도가 가장 높게 나타나고 있으며, 운영가용도는 가장 적게 나타나고 있다. 이것은 고장 발생 후 처리되는 실제 운영시간이 단순히 고장수리시간을 가지고 비교하는 고유가용도보다 무조건 낮은 수치로 나타날 수밖에 없으며 - 하지만 실제 운영상 발생하는 가용도 이므로 수치상의 신뢰도는 높다. - 가용도를 100%에 근접하게 유지하는 것을 요구 받을 경우 운영가용도는 사용이 불가능하다. 운영가용도를 적용하는 경우 일반적으로 88.5% ~ 93.5%가 적절한 값으로 보고 있으며, 달성가용도의 경우 96.5% ~ 98.5%를 제시하고 고유가용도는 98.5% ~ 99.5%를 제시하고 있다. 일반적으로 건설단계에서는 신뢰성 지표로서 MTBF 또는 MKBF를 요구하고 있지만 가용도를 요구하여 전체 열차의 안전성을 포함하여 관리하고 있는 노선을 Table 1에 정리하였다.

가용도를 제시하는 경우 가용도식에 의한 정의보다는 정량적인 목표값을 요구하고 있다. 따라서 대부분의 건설사업자는 가용도 산식이 명확히 표현되는 고유가용도를 적용하고 있으며, 운영단계 조식이 투입되기 전에 가용도값에 대한 승인 및 검증이 완료되기 때문에 운영조직 역시 고유가용도를 그대로 적용하고 있다. 다음 Table 2은 가용도 파라메타별 장단점 및 RFP에서 제시할 경우의 조건⁹⁾에 대해 정리하였다.

2.2 건설 및 운영 단계에서 사용 가능한 가용도 식의 제시

가용도 검증이 정량적으로 제시되는 노선은 다음 Table 3에 정리하였다. Table 3의 결과를 보면 대부분의 노선에서는 신뢰도 수치를 제시¹⁰⁾하고 검증하는 것

Table 2. Application examples of availability by route

Availability type	Advantages and disadvantages	RFP conditions
Inherent	- No effect on train operating conditions - Easy to calculate availability - Failure to consider maintenance and administrative time	- MTBF and MTTR Need to be clearly presented
Achieved	- Clearly indicates train status - Failure to consider actual downtime during maintenance and administration - MITMa validation takes a lot of time and money	- MTBF and MTTR Need to be clearly presented
Operational	- Selection of actual operational availability - Increased time and cost in operational utility validation	- Show administrative delay of MTBF, MTTR, - Use only when the constructor is responsible for administrative delays.
Fleet	- Better to understand the simple status of the vehicle in service - Train add and remove times will vary over time	- New routes should clearly present train operating plans to RFP
Schedule	- Easy to understand the quality of service use - In case of non-compliance, the responsibilities of the operator and the constructor are unclear	- New routes should clearly present train operating plans to RFP

을 RAMS 전체의 검증으로 하는 것이 대부분이고 특히 대전도시철도 1호선의 경우에는 2,000km 마다 분석한 결과 약 11,000KM의 MKBSF 결과값¹¹⁾을 얻었다.

(단, 인천국제공항 IAT 노선에서는 사업자가 MKBF를 역으로 제안하고 승인 받았다.) 여기에 적용하는 가용도는 대부분 고유가용도를 제시하며 운영상의 가용도 값에 대해서는 정의되지 않았다. 이것은 건설사업자에 대한 건설 이후 검증을 위한 사업자 페널티를 부과하기 위해 사용하기 때문이다.

가용도를 정의하는 국내외 노선의 사례를 검토한 Table 2와 같이 가용도는 대부분 고유가용도를 사용하며, 건설단계 이후 최종 확인단계까지 목표값의 도달 여부에 대해서만 검증하는 것으로 하였다.

IEC62278 철도 RAMS에서 제시하는 가용도 파라메타는 건설단계에서 적용하는 가용도와 운영단계에서 적용하는 가용도로 구별이 가능하며, 대부분의 발주처에서는 건설단계에서 가용도 검증을 요구하고 있다. 따라서 이러한 요구조건을 만족하기 위해서는 사업자는 계산 수치가 간단하고, 검증기간이 짧은 고유가용도를 사용한다.

운영 가용도는 운영조직의 긴밀한 협력 관계에 의한 시간까지 고장 시간으로 정의되어야 하므로 대부분의

Table 3. Quantitative availability requirements

Customer	Country	MKBF goal	Availability goal
NYCT railway	USA	160,900KM	-
ATTIKO railway	GRESE	160,000KM	99%
MTRC railway	HONGKONG	166,666KM	96.5%
Ireland diesel car	IRELAND	50,00KM	95%
SEPTA railway	USA	160,000KM	-
KTX	KOREA	121,000KM	-
Incheon airport IAT	KOREA	98,900KM	99.5%

운영기관에서는 건설사업자가 제시한 가용도값을 그대로 적용하고 있다. 이것은 실제 운영방법에 따라 변화되는 파라메타의 정의가 어렵고 데이터의 신뢰성에도 문제가 크다. 따라서 건설 초기부터 노선 종료시까지 사용이 가능한 가용도 식이 필요하다. 제시되는 가용도는 시스템 가용도로서 1일 단위로 가용도를 산정하는 것이 가장 큰 특징이다.

1일 가용도를 적용하는 것은 시스템이 속한 환경이 언제나 같은 상황이 아니기 때문이다. 1일 단위의 가용도는 매일 변하는 주변 환경에 가장 민감하게 적용이 가능하며, 제시하는 시스템 가용도는 순수 고장발생 및 수리시간으로 정의되므로 1일 가용도의 사용은 시스템의 상태를 점검하기에 가장 적합하다. 또한 기본 단위를 1일 가용도로 하고 누적 가용도를 병행하여 적용하게 되므로 가용도 산정값의 신뢰도 향상을 기대할 수 있으며, MTBF 또는 MKBF와 같은 고장과 고장사이의 시간을 정의할 필요가 없으므로 주기적인 운용시간과 고장시간이 명확한 시스템의 전체에 적용이 가능하다.

시스템 가용도식은 다음 Fig. 2과 같다.

Fig. 2 식에서 SyUPTIME은 System Uptime으로서 1일 운영시간을 의미한다. SyDOTIME은 한 개의 차량 또는 운영모드 등이 고장 발생하여 복구되기까지의 시간을 의미하며, 정상 운영모드로 복구될 때까지의 모든 처리시간이 포함된다.

$$SyA = \frac{(SyUPTIME \times OpM)}{(SyUPTIME \times OpM) + (SyDOTIME \times FaM)}$$

SyUPTIME : System operation time of one day(Hours)

SyDOTIME : system downtime(Hours)

OpM : Total operational system quantity

FaM : Total failed system quantity

$$SyA(Total) = SyA(1) \times SyA(2) \times \dots \times SyA(n)$$

SyA(n) : Total availability of individual system

Fig. 2. Suggestions for system availability calculations.

OpM은 운영 가능한 시스템의 전체 수량을 나타내며, 열차의 경우 고장 시 가용도에 영향을 미치는 차량들의 전체 수량을 의미한다. OpM은 전체 시스템 뿐만 아니라 각 시스템의 Level에 따라 다양한 ITEM들로 구분된다. 예를 들면, 철도 시스템의 차량, 신호, 전기, 통신 시스템은 각 운영시간 별 운영 가능한 수량의 선정을 통해 OpM을 정의할 수 있으며, 차량시스템의 하위 Level의 경우 Inverter, SIV, Brake, Ventilation, Bogie 등의 각 품목별 운영시간을 OpM으로 정의할 수 있다.

FaM은 고장이 발생한 시스템을 의미하며, 열차의 경우 편성 단위가 아닌 차량 단위로 수량을 정의한다. 최근의 경전철은 1량 혹은 2량 단위가 많으며, 편성으로 조합이 가능하지만 개별로 분산이 가능하므로 1개 편성 중 1개 차량 고장 시 전체 열차가 가용도에 영향을 미치지 않을 수 있기 때문이다. 여기에 더하여 OpM, FaM은 각 시스템의 세부 수량을 나타내므로 정전 또는 재해로 인해 발생하는 전체 노선 정지 등을 제외하고는 고장 범위를 세분화가 가능하고 FaM은 고장 아이템에 대해 LRU 단위까지 세분화 할 수 있다.

2.3 가용도 검증을 위한 건설 및 운영 단계 노선

무인 경량전철 시스템을 채택하여 운영하고 있는 여러 노선 중 가용도를 적용하여 검증하고 있는 노선은 인천공항 셔틀트레인이 있다. 특히 셔틀트레인 노선은 기존 2단계 구간(터미널 1에서 탑승동A)에서 운영하고 있는 0.9 km 구간의 복선 셔틀노선을 연장하여 중간역인 탑승동B역에서 평면환승을 하고 신규 터미널인 터미널 2까지 동종의 시스템이지만 다른 열차 구성으로 복선 셔틀노선으로 1.5 km구간을 왕복하는 총 4개의 노선으로 이루어져 있으며, Fig. 3과 같다. 셔틀트레인 노선은 탑승동에 평면 환승이 가능하도록 하였고, 동일 선로 양측으로 열차가 동시 진입을 막기 위하여 동기 모드와 비동기 모드로 운영을 하고 있다. 따라서 전체 노선을 보면 역사 3개, 4개 노선의 단선 운영을 하고 있다. 열차의 구성은 2단계 노선의 경우 4량1편성으로 구성되고 있으며, 가용도 산정을 위해 열차 고장 시

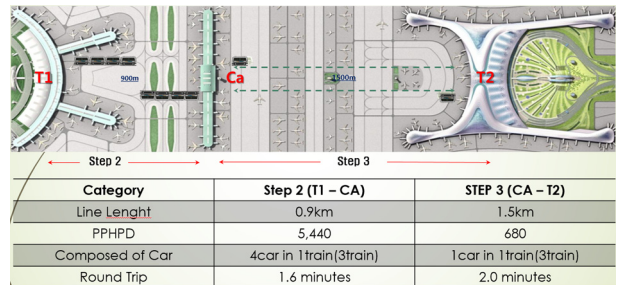


Fig. 3. Overview of shuttle train routes.

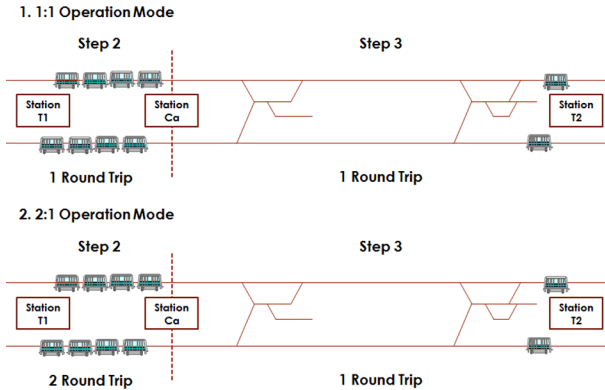


Fig. 4. Normal operation mode of shuttle train.

3량1편성이 고장 발생할 경우 3량 고장으로 하고, 4량1편성 중 1량1편성이 고장일 경우 3량1편성은 운영이 가능하므로 1량만 고장으로 판별이 가능하다.

무인 경량전철 시스템은 1량 단위로 열차가 구성되므로 위와 같은 편성 변경이 가능하고 실제 차량기지 에서 단순히 연결기 분리뿐만 열차의 조합 변경이 가능하다. 열차의 운영 방법은 Fig. 4와 같이 1:1 운영모 드와 2:1 운영모드를 병행하여 운행한다.

기존 노선의 경우 Fig. 3에 나타난 수송능력을 고려 하여 열차 편성조합 수량도 크고 거리도 신규 3단계보 다 짧다. 따라서 기존 2단계에서 2왕복 운행 시 신규 3 단계 노선에서 1왕복하는 운영방법을 2:1 운영모드로 정의하고, 탑승동을 중심으로 대각선으로 동시에 진입 진출하는 방식을 1:1 운영모드로 정의한다. 1:1 운영모 드에서는 신규 3단계 열차의 최고속도 구간이 증가로 일주 소요시간을 보상한다.

위의 셔틀트레인 노선은 신규 3단계 건설단계에서 부터 가용성 목표값을 99.5%(개통 후 6개월 연속 달성 조건)로 RFP에서 제시하였으며, 사업자는 신뢰성 수치를 포함하여 RFP에서 요구하는 주요 시스템은 차량, 신호 및 PSD의 가용성 목표값을 제시하였다. 다음의 Table 4는 건설단계에서 사업자가 제시한 가용성 목표 값으로서 RFP 조건을 만족하도록 제시한 값이다.

건설단계에서 사업자가 제시한 가용도값은 고유가 용도로서 운영 후 6개월 연속 99.5%를 입증해야하는 문제로 인하여 최대한 단순하고 많은 노선에서 사용하여 검증이 용이한 가용도 파라메타를 적용하였다.

Table 4. Availability target value (construction company)

Availability subsystem	Requirement value	Target value
Vehicle	-	99.991%
Signal	-	99.828%
Platform screen door	-	99.530%
Total availability (Average)	99.5%	99.780%

이는 대부분의 건설단계 노선에서 선택하여 적용하고 있는 것을 타 노선의 사례에서 확인이 가능하였다. 또한 셔틀트레인 노선은 기존 2단계 구간에서 열차가 운영하고 있으면서 (3단계 건설 당시에는 3량1편성으로 운영) 지속적으로 고유가용도를 관리하고 있었다. 따라서 건설단계의 고유가용도와 현재까지 운영하고 있는 2,3단계 고유가용도의 자료를 바탕으로 제시하는 시스템 가용도를 분석하여 검증하는 것으로 한다. 시스템 가용도를 산정하기 위해서는 다음의 내용이 전제 조건으로 이루어져야 한다.

1) 열차는 운행 불가능한 차량을 분리 가능하여 운행이 가능한 경우 운행 불가능한 차량만 가용도에서 고장으로 정의한다.

2) 신호시스템은 4개 선로(2단계 2개 노선, 3단계 2개 노선)으로 구성되며 신호시스템 1개 고장 시 1/4 고장으로 정의한다.

3) PSD는 UNIT 단위로 분산 가능하므로 터미널 1과 탑승동 A의 경우 PSD UNIT 전체 수량인 32개 대비 고장 UNIT 수량으로 정의하고, 탑승동B와 터미널 2의 경우 16개 전체 UNIT 대비 고장 UNIT 수량으로 정의한다.

기존 운영하고 있는 노선의 가용성은 위의 차량, 신호, PSD만을 대상으로 검증하고 있으므로, 본 논문에서는 다른 시스템은 제외하고 위의 3개 중요 시스템을 대상으로 선정하였다.

2.4 운영단계에서 가용도 검증

가용도 검증을 위하여 특정 이벤트에 대한 가용도를 각 가용도 파라메타와 시스템가용도와 비교한다. 다음 Fig. 5은 인천공항 셔틀트레인의 건설사업 초기에 사업자가 제시하는 차량분야 가용성 목표값으로, MTBF값을 포함하고 있으며, 고유가용도의 MTBF 인자로 적용하였다.

LEVEL 1	LEVEL 2	LEVEL 3	Failure rate	MTTR(hr)	MTBF(hr)	Non Availability	Availability	ITEM Non Availability	ITEM Availability
차량	Propulsion Control	Condition	1.27E-06	0.17	7.91E+05	2.15050E-07	99.9999785%	1.9150E-06	99.999808%
		Controller	1.00E-05	0.17	1.00E+05	1.70000E-06	99.9998300%		
		total	1.13E-05	0.17	8.88E+04	1.91505E-06	99.9998085%		
	Brake Controller	Emergency Condition	2.68E-06	0.17	3.95E+05	4.30100E-07	99.9999570%	7.6245E-07	99.99992%
		Normal Condition	1.15E-07	0.17	8.70E+06	1.95500E-08	99.9999980%		
		Controller	1.84E-06	0.17	5.43E+05	3.12800E-07	99.9999687%		
		total	4.49E-06	0.17	2.23E+05	7.62450E-07	99.9999238%		
		Motor	2.71E-06	0.17	3.69E+05	4.60700E-07	99.9999539%		
	Other Elec	Direction Change	1.88E-06	0.17	7.25E+05	2.34600E-07	99.9999765%	3.7157E-05	99.99628%
		Door Operation	2.76E-06	0.17	3.62E+05	4.69200E-07	99.9999531%		
		Control Power	1.61E-04	0.17	6.21E+03	2.73700E-05	99.972631%		
		HVAC	1.69E-05	0.17	5.91E+04	2.67470E-06	99.9997125%		
		Communication	3.38E-05	0.17	2.96E+04	5.74940E-06	99.9994251%		
		total	2.19E-04	0.17	4.57E+03	3.71586E-05	99.9962843%		
		total	2.19E-04	0.17	4.57E+03	3.71586E-05	99.9962843%		
	Mechanical Equipment	Air Brake	9.08E-06	0.17	1.10E+05	1.54360E-06	99.9998456%	2.5840E-06	99.99974%
		Door	3.60E-07	0.17	2.78E+06	6.12000E-08	99.9999939%		
		Steering	5.76E-06	0.17	1.74E+05	9.79200E-07	99.9999021%		
		total	1.52E-05	0.17	6.58E+04	2.58400E-06	99.9997416%		
	TOTAL							7.21643E-05	99.99278%

Fig. 5. Proposal of MTBF and availability by 3rd shuttle train.

운영 노선에서의 검증은 Fig. 6과 같이 120일 누적 운행 데이터를 기반으로 하였으며, 차량은 총 6개의 알람이 발생하였다. 각 알람은 출입문이 5개, 대차가 1개이며, 가장 많이 사용하고 있는 고유가용도와 시스템 가용도를 분석하여 가용도 수준을 확인하였으며, 다음 Table 5와 Table 6은 출입문 알람과 대차 알람에 대해 각 가용도 식과 시스템 가용도식을 분석한 값이며, 아래 내용은 해당 고장 시 시스템 환경 조건이다.

- 1) System operation time = 24 Hr
- 2) 00:00~05:30 Train Quantity : 5량
- 3) 05:30~22:30 Train Quantity : 10량
- 4) 22:30~24:00 Train Quantity : 5량
- 5) 고장건수 : 1회 기준
- 6) 고장복구시간 : 각 표의 MTTR에 의함

Table 5, 6의 특정 이벤트에 대한 가용도를 비교한 결과 초기 이벤트 1개의 경우 다른 가용도보다 시스템 가용도값이 낮게 산정되었다. 이것은 부품의 가용도를 적용하기 위한 MTBF값이 사전에 정의되어 제시되는 경우가 대부분으로서 부품의 신뢰도를 확인 가능한 욕조곡선(Bath-Tube)에 의하면 시간이 경과할수록 MTBF값은 줄어들게 되고, 모든 가용도 수식에서 정의되는 가용도값은 MTBF값에 비례하기 때문에 시간 경과에

Table 5. Comparison of availability against train failures(1)

Accident type	Door fail to open	MTTR
Inherent availability A_i	$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{278,000}{278,000 + 0.17} = 99.9999\%$	0.17Hr
Operational availability A_o	$A_o = \frac{MTBM}{MTBM + MTTM_o} = \frac{278,000}{278,000 + 0.31} = 99.9998\%$	0.31Hr
System availability SyA	$SyA = \frac{(S_y UPTIME \times OpM)}{(S_y UPTIME \times OpM) + (S_y DOTIME \times FuM)}$ $SyA = \frac{(5.5 \times 5) + (17 \times 10) + (1.5 \times 5) - (0.31 \times 1)}{(5.5 \times 5) + (17 \times 10) + (1.5 \times 5)} = 99.849\%$	0.31Hr

Table 6. Comparison of availability against train failures(2)

Accident type	BOGIE Change of A Side Fail	MTTR
Inherent availability A_i	$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{138,000}{138,000 + 0.17} = 99.9998\%$	0.17Hr
Operational availability A_o	$A_o = \frac{MTBM}{MTBM + MTTM_o} = \frac{138,000}{138,000 + 0.62} = 99.9995\%$	0.62Hr
System availability SyA	$SyA = \frac{(S_y UPTIME \times OpM)}{(S_y UPTIME \times OpM) + (S_y DOTIME \times FuM)}$ $SyA = \frac{(5.5 \times 5) + (17 \times 10) + (1.5 \times 5) - (0.62 \times 1)}{(5.5 \times 5) + (17 \times 10) + (1.5 \times 5)} = 99.698\%$	0.62Hr

따라 누적된 고장에 대한 가용도는 초기 1개 고장 대비 현저히 줄어들게 된다.

고장 또는 사고는 정량적인 고장률에 의해 결정되기도 하지만 대부분의 사고는 우발적 또는 외부요인에 의해 결정된다. 부품의 정량적 MTBF로는 이러한 우발적 사고 - 특히 개통 후 초기 고장 - 에 대해 다른 파라메타와 시스템 가용도를 비교하면 시스템 가용도 값이 현저히 높게 나타나는 것을 알 수 있다. Table 5 또는 6에서 MTBF값을 초기 고장 시간 또는 초기 고장 거리로 산정하면 확인 가능하다. Table 5에서 출입문의 고장을 1일, 24시간으로 MTBF를 산정하면, 고유가용도의 경우 99.29%, 시스템 가용도의 경우 99.69%의 차이가 발생하게 된다.

열차의 상태를 확인하는 가장 기본 단위는 열차의 1일 운영시간으로서 특정 기간 내 이벤트에 대해 한정할 경우 위의 사례와 같이 데이터의 신뢰성 측면에서 타 가용도 산정 파라메타보다 우수한 것을 확인할 수 있다.

결과적으로 시스템 가용도는 이러한 초기 운영단계에서부터 적정 가용도값을 제시가 가능하다. 이는 시간의 흐름에 따라 열차 고장 빈도가 높게 되는 단계에서도 고장 빈도에 맞게 가용도 제시가 가능하며, 가용도 검증 또는 신뢰성 검증 시 운영 단계에서 1개월 연속에서 6개월 연속을 유지하는 것을 한정하고 있으므로 초기 고장의 경우 시스템 가용도값이 다른 파라메타에 비해 낮게 나타나지만, 분석한 타 사업 노선들의 가용도 목표값 이내로 만족하고, 초기 고장률이 높은 기간이 지나 안정화 단계에 접어들게 되면 오히려 시스템 가용도 값이 더욱 높게 나타나게 된다.

120일 누적데이터에 의하면 이 기간 PSD가 1회 알람이 발생하였다. PSD의 MTTR은 0.3 Hr로서 시스템 가용도는 99.817%가 된다. 따라서 120일 전체 시스템에 대한 가용도는 신호 100%, 차량 99.992%, PSD 99.998%로서 전체 서틀트레인 가용도는 99.991%가 된다. 이는 고유

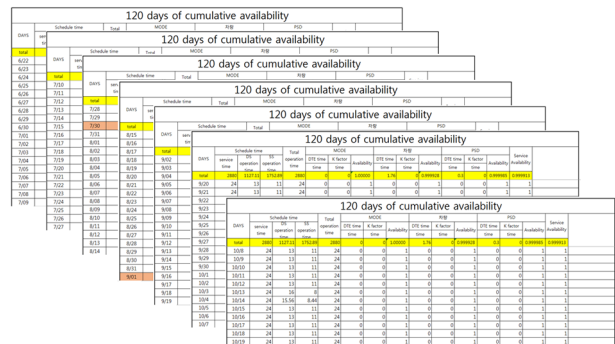


Fig. 6. 120-Days cumulative availability on operational routes.

가용도의 값과 유사한 데이터로서 시스템 가용도의 신뢰성에 대한 검증을 포함하고 있다.

3. 결론

무인경량전철 시스템에서는 각 시스템의 무인화에 대한 높은 신뢰도가 요구되며, 이러한 신뢰도를 달성하기 위해 사업 초기 RFP 단계에서부터 신뢰도 또는 가용도를 사업자에게 제시하고 목표를 달성하도록 요구하고 있다. 본 논문에서는 철도시스템에서 적용하고 있는 가용도를 분석하고 국내외에서 사용하고 있는 가용도의 수준을 확인하였다. 또한 각 파라메타별로 사용하고 있는 가용도 산식의 장단점을 분석하고 적절한 가용도별 가용도 수준을 제시하였다. 그 결과 가용도 목표값이 무조건 100%에 근접하게 요구할수록 고유가용도를 적용하는 사례가 많았으며, 적정 가용도를 사업자가 제시할 경우 달성가용도 또는 운영가용도를 사용하기도 하였다. 본 논문에서 제시하는 시스템가용도는 1일 가용도를 산정하여 검증하고 단순 고장 수리시간 뿐만아니라 지연시간을 모두 포함할 수 있으므로 운영기관에서 검증하기에도 용이하고, 누적 가용도를 확인한 결과 기존의 파라메타와 거의 차이가 없으므로 전체 건설단계부터 운영단계까지 사용이 가능하다.

제시되는 가용도는 무인운전으로 운행하는 최소단위 1량 1편성의 경량전철 시스템에 가장 적합하며, 고장요소를 세분화하여 운용 가능한 정상상태의 모듈을 사용할 수 있는 시스템이 구축된 노선에 적정하다. 또한 고장 모드 값에 대한 정의를 별도로 하게 되면 열차 뿐만 아니라 타 시스템에서도 가용도 산정이 가능하다.

본 논문에서 제시하는 시스템 가용도는 MKBF 또는 MTBF를 산정하지 않고 실제 운행하고 있는 시스템의 고장수리시간(MTTR)만을 가지고 적용하기 때문에 기존 노선에서도 적용이 가능하고 시스템 정의가 단순한 단선 노선의 무인 경량전철 시스템에 가장 최적화되어 활용이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글 : 이 논문은 서울과학기술대학교 교내연구비에 의하여 연구되었습니다.

References

- 1) IEC 62267-2:2011, Railway Applications Automated Urban Guided Transport (AUGT) Safety Requirements - Part 2 : Hazard Analysis at Top System Level, International Electro Technical Commission
- 2) KS C IEC 62278:2002, Railway Applications Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS), International Electro Technical Commission
- 3) J. G. Hwang, H. J. Jo, C. H. Han, W. S.k, Cho and J. Ahn, "Development and Application of Safety Activity Process for Railway Signaling Systems", J. Korean Soc. Saf., Vol. 25, No. 1, 2010.
- 4) I. S. Chung, J. W. Kim and K. W. Lee, "The Study on the Demonstration Test of Quantitative Reliability Requirements for Rolling Stocks", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 11, No. 3 pp. 233-239, 2008.
- 5) M. C. Lee, "A Study on Reliability & Availability of Train Detection using Virtual Track Circuit", Department of Railroad Electrical & Signalling Engineering, Graduate School of Railroad, Seoul National University of Science and Technology, 2012.
- 6) M. G. Park and S. H. Han, "A Study on the Risk based RAMS Assessment for Railway Rolling Stock Systems", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 64P, No. 4, pp. 220-230, 2015.
- 7) Y. H. Cho, H. W. Lee, J. W. Kim and J. M. Yang, "A Study on Reliability Indicator Analysis and Management Method of Railway Vehicle Component", Journal of Korean Society for Urban Railway, Vol. 6, No. 1, pp. 27- 36, 2018.
- 8) H. S. Yun, K. S. Lee, S. K. Ryou and D. I. Yang, "A Study on the RAMS Analysis of Urban Maglev Train Control System", Journal of Korean Society for Railway Vol. 14, No. 6, pp. 515-525, 2011.
- 9) I. S. Chung, K. W. Lee and J. W. Kim, "A Study on RAMS Parameters in the Procurement Requirement for Rolling Stock", Journal of Korean Society for Railway, Vol. 11, No. 4, pp. 371-377, 2008.
- 10) C. S. Kim and H. S. Lee, "Reliability Analysis of Electric Door System for EMU", J. Korean Soc. Saf., Vol. 28, No. 8, pp. 52-56, 2013.
- 11) K. J. Kim and K. O. Lee, "A Study on the Improvement for EMU Maintenance System of Urban Transit", J Korean Soc. Saf., Vol. 25, No. 1, pp. 87-92, 2010.