

철도시스템의 RAM 체계구축을 위한 가용도 적용에 관한 연구

A Study on The Availability Calculation Method for RAM System of Railroad Systems

김재훈* 박준서** 김종운** 유원희**
Kim, Jaehoon Park, Jun Seo Kim, Jong Woon You, Won hee

ABSTRACT

본 연구에서는 철도시스템의 RAM 체계구축과 관련하여 R. A. M 중 하나의 필수 요소이며, 실제 운행하고 있는 철도시스템이 얼마나 잘 운행되고 있는지를 나타내는 지표인 철도시스템 가용도(Availability)에 대하여 해외규격, 국내외 발주사양 등을 통해, 가용도 계산방법 등을 비교분석해 보았다. 그 결과, 백분율 % 값으로 계수화된 가용도 목표가 요구된 발주사양의 경우에도 수요처에 따라 가용도 목표의 계산방법이 다르며, 각각의 시스템에 맞춰 수정된 방법을 요구하고 있다. 우리나라도 우리나라 철도환경 및 시스템에 맞는 가용도 계산이 필요하며, 이에 따라 우리나라 철도시스템에 맞는 가용도 연구를 위해 본 연구에서는 해외규격, 국내외 발주사양 분석 결과들과 관련 문헌들을 바탕으로 철도시스템 가용도 계산방법(안)을 만들어 국내 철도시스템에 제안해 보았다.

1. 서론

1899년 우리나라에 철도가 시작된 이래 철도시스템의 발전은 증기기관차 운행에서부터 시작하여 1955년 디젤전기기관차, 1972년 전철화에 따른 전기기관차 도입, 1974년 수도권 전기동차 그리고 2004년 철도시스템 첨단기술의 집약체인 KTX가 운행하게 되면서 현재까지 다양한 차종의 운행과 더불어 기술발전을 거듭해 오고 있다. 그리고 이러한 기술발전 중, 특히 KTX 도입과 관련하여 우리나라에 철도시스템 RAM (Reliability, Availability, Maintainability)에 대한 내용 및 기술들이 소개되기 시작하였다. 해외에서는 이미 철도시스템 구매시 RAM 요구를 발주사양에 포함하고 있으며, 철도시스템의 설계뿐만 아니라 운영 및 유지보수, 폐기에 이르기까지 전 과정에 걸쳐 RAM 체계를 통해 관리하고 있다. 하지만 국내 철도시스템에 있어서는 프랑스 ALSTOM사로부터 도입한 KTX 이외에는 최근까지 철도시스템 설계 및 운영 등에 걸쳐 RAM 체계를 적용한 경우가 없으며, 최근 들어 몇몇 지자체 및 운영기관에서 철도시스템 발주시 해외 등의 자료를 참고로 일부의 RAM 요구조건들을 요구하고 있는 형편이다. 하지만 이는 아직 국내실정에 맞는 철도시스템 RAM 기준이라 보기 어려우며, RAM 성능을 시험하기 위한 절차도 확립되어 있지 않다. 따라서 국내 철도시스템에 적용할 RAM 체계구축이 필수적이며, 관련된 기반기술 연구가 필요하다.

그리고 본 연구에서는 철도시스템의 RAM 체계구축과 관련하여 R. A. M 중 하나의 필수 요소이며, 실제 운행하고 있는 철도시스템이 얼마나 잘 운행되고 있는지를 나타내는 지표인 철도시스템 가용도(Availability)에 대하여 해외규격, 국내외 발주사양 등을 통해, 가용도 계산방법 등을 비교분석 하고, 이를 통해 국내 철도시스템에 적용할 가용도 계산 방법(안)을 제안해 보았다.

* 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원, 철도시스템안전연구본부

E-mail : lapin95@krri.re.kr

TEL : (031)460-5248 FAX : (031)460-5279

** 회원, 한국철도기술연구원, 철도시스템안전연구본부

2. 본문

2.1 국내의 철도시스템의 가용도 요구 목표

국내외 철도시스템 발주사양을 통해 철도시스템 가용도 요구 목표를 조사 분석한 결과, 표1과 같이 A국, B국, C국, D국 등 몇몇 수요처의 발주사양에는 구체적으로 철도시스템 가용도 요구 목표 값이 정해져 있음을 확인하였다. 하지만, 우리나라의 KTX를 포함하여 E국, F국 등의 경우에는 계수화된 요구사항이 없는 경우도 있다. 이 경우 가용도는 신뢰도 및 정비도와 연관된 것으로 보고 이들 두 항목의 관리를 통해 달성되는 것으로 간주한 것이라 판단된다. 하지만 가용도는 시스템의 원활한 운영에 중요한 요인이므로 표1과 같이 수요처의 계수화된 가용도 목표와 그에 따른 운영조건, 기술 사양 등을 명확히 요구조건에 명시한 것이 설계에서 폐기까지 철도시스템을 전주기적으로 RAM 체계로 관리하는데 보다 효율적이라고 판단된다. 또한 표1과 같이 백분율 % 값으로 계수화된 가용도 목표가 요구된 발주사양의 경우에도 수요처에 따라 가용도 목표의 계산방법이 다른 것으로 확인되었다. 따라서 표1을 포함하여 국내외 자료의 가용도 계산 방법을 분석할 필요가 있으며, 이를 다음에서 자세하게 설명하였다.

2.2 국내의 철도시스템의 가용도 계산 방법 분석

앞에서 설명한 것과 같이 국내외 철도시스템의 가용도 목표 요구를 분석한 결과 각각의 가용도 목표 요구는 백분율화된 수치로 계수되어 있지만, 그 계산 방법은 다른 것을 확인하였다. 따라서 표1의 가용도 목표는 서로 다른 의미를 나타내고 있다. 따라서 이러한 가용도 계산 방법을 해외 관련 규격과 국내외 철도시스템 발주사양 등을 통해 비교 분석하였다.

1) MIL-HDBK-338B (미국 국방규격) 가용도 계산 방법

RAM 이론 및 적용은 미국 국방분야에서 시작되었고, 현재에도 주도적으로 이끌고 있다고 말해도 과언이 아니다. 그리고 이러한 미국 국방분야에서 가용도에 대한 이론 및 정의는 MIL-HDBK-338B에 나와 있다. MIL-HDBK-338B에서 정의한 가용도는 수리가능하며, 연속적으로 운행되는 시스템을 대상으로 하며 확률로 표현되고 있다. MIL-HDBK-338B의 시스템 가용도 정의 및 계산방법은 다음과 같다.

- ① 순간 가용도(Instantaneous Availability) $A(t)$: 시스템 운행이 시작된 후부터 임의 시간에 시스템 사용이 가능함에 대한 확률.
- ② 임무 가용도(Mission Availability) $A_m(t_2-t_1)$: 임무 수행 중에 시간간격 (t_2-t_1) 에 대한 시스템 사용 가능, 또는 평균 가용도(Average Availability) A_{AV} 라고도 함.

표 1 국내외 철도시스템 가용도 목표 예

수요처	가용도 목표
A국가	99.0% 이상
B국가	96.5% 이상
C국가	98.0% 이상
D국가	99.0% 이상
E국기	없음
F국기	없음
KTX(한국)	없음

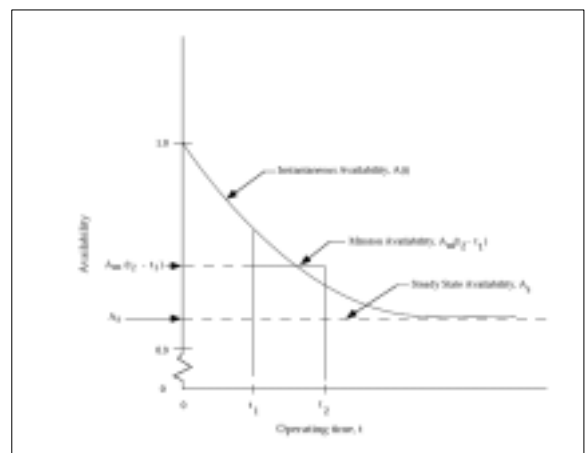


그림 1 MIL-HDBK-338B 가용도 설명

$$A_m(t_2-t_1) = \frac{1}{t_2-t_1} \int_{t_1}^{t_2} A(t) dt$$

③ 정상상태 가용도 (Steady State of Availability) A_S : 시스템 운행이 시작된 후 사용시간이 매우 길거나 혹은 무한 시간에 가깝도록 시스템 사용 가능에 대한 확률.

$$A_S = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t)$$

위 3가지 가용도 정의는 그림 1로 표현이 된다.

④ 성취 가용도 (Achieved Availability) A_A : 시스템 가용시간을 Down Time(보수(corrective) 및 예방정비(preventive maintenance) 포함한 유지보수 시간, 행정 시간(administrative time), 로지스틱 시간(logistic time))과 Up time(운행시간)으로 구분하여 계산한 가용도.

$$A_A = 1 - \frac{Downtime}{TotalTime} = \frac{Uptime}{TotalTime}$$

⑤ 고유 가용도 (Intrinsic Availability) A_i : 시스템의 평균고장간시간(Mean Time Between Failure, MTBF)과 평균수리시간(Mean Time To Repair, MTTR)을 계산하여 구한 시스템 가용도. 단, 성취가용도와는 달리 행정시간과 로지스틱 시간은 포함되지 않으며, 사실상 일반적으로 예방정비시간도 포함되지 않는다.

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

2) A국 발주사양의 가용도 계산 방법

A국 발주사양의 가용도 계산방법의 경우 다음과 같은 가용도 계산 방법을 사용하고 있으며, 요구 목표는 99% 이상이다.

$$A = \frac{t_a}{t_s}$$

이때, t_a 는 하루당 영업운행을 위해 사전에 계획되어 실제 운행된 열차 운행 시간의 총합(단, 예비열차와 유지보수 상태의 차량 제외), t_s 는 하루당 운행 계획된 열차 운행 시간 총합이다. A국 발주사양의 가용도는 MIL-HDBK의 성취 가용도와 형태상 유사하지만 차이가 있다. A국 발주사양의 가용도는 MIL-HDBK의 성취 가용도와 달리 Downtime을 고려하지 않고 Uptime만을 정의하고 있기 때문에 유지보수상태의 차량은 가용도 계산결과와 무관하며, 오직 운행 스케줄 달성에만 초점이 맞춰져 있다. 따라서 이 가용도는 MIL-HDBK의 성취 가용도와 다르며, 운영주체 관점의 서비스 가용도라 볼 수 있다.

3) B국 발주사양의 가용도 계산 방법

B국 발주사양의 가용도 계산방법의 경우 다음과 같은 가용도 계산 방법을 사용하고 있으며, 요구 목표는 96.5% 이상이다.

$$A = 1 - \frac{DT(RE)/3 + DT(OPM) + DT(CM)}{TotalTime}$$

이때, DT(RE)는 운행점검(servie check)을 위한 Down Time, DT(OPM)은 예방정비를 위한 Down Time, DT(CM)은 보수정비를 위한 Down time 이다. B국 발주사양의 가용도는 MIL-HDBK의 성취 가용도 계산방법을 사용하였지만, Down time을 정의하는데 있어 행정 시간과 로지스틱 시간을 제외하였으며, 운행점검, 예방정비, 보수정비 등 유지보수에 관련된 항목만을 Down time에 고려하여 계산하였다. 또한 운행점검 항목인 DT(RE)을 “3”이라는 특정한 수로 나눈 값을 사용함으로써, B국의 경험을 바탕으로

로 가용도 계산방법을 수정한 것으로 판단된다.

4) C국가 발주사양의 가용도 계산 방법

C국 발주사양의 가용도 계산방법의 경우 다음과 같은 가용도 계산 방법을 사용하고 있으며, 요구 목표는 98% 이상이다.

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + MPMT}$$

이때, MTBF는 백만 마일당 고장건수로부터 얻어진 평균고장간시간(Mean Time Between Failure)이며, MTTR은 평균수리시간(Mean Time To Repair), MPMT는 평균예방정비시간(Mean Preventive Maintenance Time)이다. C국 발주사양의 가용도는 MIL-HDBK의 고유 가용도 계산방법을 사용하였으나, 이 경우에는 일반적인 경우와 다르게 평균예방정비시간을 추가로 고려하여 가용도를 계산하였다.

5) D국가 발주사양의 가용도 계산 방법

D국 발주사양의 가용도 계산방법의 경우 특이하게 다음과 같이 고유 가용도(A_i)와 서비스 가용도(Daily System Availability, DSA) 2가지 방법의 가용도 계산법을 제시하고 있으며, 요구 목표는 서비스 가용도 기준으로 99% 이상을 요구하고 있다.

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}, \quad DSA = \frac{H_o}{H_s}$$

이때, 서비스 가용도의 H_o는 실제 철도시스템이 서비스를 제공한 시간이며, H_s는 철도시스템의 운영이 계획 시간이다.

위의 규격과 발주사양을 분석 결과, 철도시스템에서는 시스템의 가용도 계산을 각각의 시스템에 맞춰 수정된 방법을 요구하고 있으며, 우리나라도 우리나라 철도환경 및 시스템에 맞는 가용도 계산이 필요하다. 이에 따라 우리나라 철도시스템에 맞는 가용도 연구를 해야 하며, 그 일환으로 본 연구에서는 위의 분석 결과들과 관련 문헌들을 참고로 다음과 같은 가용도 계산 방법(안)을 만들어 국내 철도시스템에 제안해 보았다.

2.3 국내 철도시스템의 가용도 계산 방법(안)

본 연구에서는 앞에서 설명한 MIL-HDBK-338B의 성취 가용도 방법을 바탕으로 철도시스템이 계획된 영업 서비스를 수행할 때, 사용 가능성이 확률로 표현되는 다음과 같이 가용도 계산 방법(안)을 제시하였다.

$$A = \frac{Uptime}{Uptime + Downtime}$$

Up time = Mission Time + Alert Time + Reaction Time + Non-operation Time

Down time = 예방 정비 시간 + 보수 정비 시간 (+ 행정 시간 + 로지스틱 시간)

1) *Mission Time* : 서비스 운행 시간 등, 2) *Alert Time* : 운행 준비 완료 후 서비스 대기 시간 등

3) *Reaction Time* : 운행 준비 시간 등, 4) *Non-operation Time* : 운행 준비 대기 시간 등

본 가용도 계산방법(안)에서도 Down Time의 경우, 예방 정비 시간 + 보수 정비 시간 (+ 행정 시간 + 로지스틱 시간) 항목을 포함하여, MIL-HDBK-338B의 성취 가용도 방법과 동일하게 적용하였다. 하지만 Up time의 경우에 실제 철도시스템 운영에 있어서는 서비스 운행 시간뿐만 아니라, 운행준비시간 및 서비스 대기시간 등 기타 고려 시간이 많기 때문에, 운행 및 정비, 대기 시간 등을 포함하여 Up time 정

의를 Mission Time+ Alert Time+ Reaction Time+ Non-operation Time으로 세분하여 구분하였으며, 각각 항은 1) Mission Time : 서비스 운행 시간 등, 2) Alert Time : 운행 준비 완료 후 서비스 대기 시간 등, 3) Reaction Time : 운행 준비 시간 등, 4) Non-operation Time : 운행 준비 대기 시간 등하여 정의하였다. 그리고 이러한 가용도 계산방법(안) 결과는 실제 국내에서 운영되고 있는 철도시스템에 적용하여 검증 및 보안 작업이 필요하며, 향후의 연구를 통해 이를 수행하고자 한다.

위의 일련의 연구 결과들은 철도시스템 가용성 향상뿐만 아니라 국내 철도시스템 RAM 관리체계 전반에서 보다 효율적이고 내실 있는 결과를 얻는데 직, 간접적으로 기여할 수 있을 것이라 판단하며, 지속적인 연구가 필요하다.

3 참고문헌

- (1) Military handbook 338B, US Department of Defence.
- (2) Reliability toolkit: Commercial practices edition, *P. MacDiarmid, D. Nicholls, S. Morris, et.*, Reliability analysis center & Rome Laboratory.
- (3) Mechanical Reliability: Theory, models and applications, *B. S. Dhillon*, AIAA, Inc.
- (4) Reliability engineering, *E. A. Elsayed*, Addison wesley longman, Inc.
- (5) Practical reliability engineering, *P. D. T. O'connor, D. Newton & R. Bromley*, John wiley & sons.