

공항철도 신호시스템 전자연동장치에 대한 RAM 예측

RAM Prediction of Signaling Interlocking System for AREX

송미옥*
Song, Mi-Ok

임성수**
Lim, Sung-Soo

이창환***
Lee, Chang-Hwan

권민혁****
Kwon, Min-Hyuk

ABSTRACT

In this paper we introduce the method, procedure and result of RAM prediction for interlocking system which is applied for AREX signaling system. For RAM prediction, we breakdown the interlocking system to the LRU level and select the LRUs of which failure can cause the service delay. The prediction of reliability is based on the Reliability Block Diagram which is the functional diagram composed of selected LRUs and finally, the availability of interlocking system is estimated from the combination of reliability and maintainability.

1. 서 론

21세기 동북아시아의 관문인 인천국제공항과 서울 도심을 연결하는 공항철도는 2007년 3월 23일 1 단계(인천국제공항역~김포공항역) 구간의 성공적 개통으로 “세계로 향하는 안전하고 편리한 공항철도”로의 첫발을 내딛게 되었다. 공항철도는 민간자본의 특성인 창의성과 효율성을 기반으로 한 운영 및 유지보수를 통해 “결점제로”, “공항 접근수단 중 고객선호 1위”, “철도운영기관 중 인당 생산성 1위” 달성을 전략 목표로 하고 있으며, 이를 위해 기전 시스템에 대한 신뢰성, 가용성, 유지보수성, 안전성의 유지 및 향상을 위한 RAMS 관리를 추진하고 있다. 특히 진로 및 열차 제어를 담당하는 신호시스템의 경우 고장의 발생이 승객의 안전 및 열차의 정시 운행에 직접적인 영향을 미칠 수 있으므로 시스템의 신뢰성과 안정성에 대한 보다 철저하고 엄격한 적용과 관리가 요구되고 있다.

본 논문에서는 공항철도 신호시스템 중 진로와 각종 신호설비(신호기, 진로표시기, 선로전환기, 궤도회로 등)를 제어 및 감시하고, 플랫폼스크린도어(PSD: Platform Screen Door)에 대한 제어 명령 및 상태정보를 전송하는 전자연동장치에 대해, 설계, 제작, 설치, 시험 및 시운전에 이르는 사업 전 기간에 걸쳐 진행한 RAM 예측 및 분석 활동의 방법, 절차 및 결과에 대한 내용을 소개하고자 한다.

2. 전자연동장치에 대한 RAM 예측 방법 및 절차

2.1 공항철도 신호시스템의 구성

공항철도는 현재 용유차량기지 및 인천국제공항에서 김포공항에 이르는 본선 1단계 구간을 건설하여 운영하고 있다.

종합관제실의 중앙 관제설비(CATS: Central Automatic Train Supervision)는 광통신망을 통해 각 운전취급실의 원격 관제설비(LATS: Local Automatic Train Supervision)와 연계되어 차량 운행 정보 전송, 스케줄 관리 및 각종 신호설비, 진로에 대한 제어 및 감시를 수행한다. 원격 관제설비는 중앙 관

* 책임저자 공항철도주식회사, 기술본부, 대리, 회원

E-mail : pinkpink@arex.or.kr

TEL : (032)745-7217 FAX : (032)745-7905

** 공항철도주식회사, 기술본부, 부장, 회원

*** 공항철도주식회사, 기술본부, 과장, 회원

**** 공항철도주식회사, 기술본부, 과장, 비회원

제설비와의 정보 송수신과 관할 구간 내 각종 신호설비 및 진로에 대한 제어 및 감시를 수행하는 장치이고, 지상 자동열차제어장치(ATC: Automatic Train Control)는 비이컨 및 레일을 통한 차상 자동열차제어장치와의 인터페이스 및 송수신 데이터의 처리를 담당하는 장치이다. 디지털 궤도회로(SDTC: Smartway Digital Track Circuit)는 열차 검지 및 레일 이상(절순) 감지와 지상 자동열차제어장치의 정보를 레일을 통해 차상 자동열차제어장치로 전송하는 역할을 담당한다.

원격 관제설비, 전자연동장치, 지상 자동열차제어장치는 1개 혹은 2개의 기계실 구간을 하나의 제어 구간으로 관할하여 동작하고 있으며, 전자연동장치와 지상 자동열차제어장치의 경우 장치별 인접 제어 구간 간의 통신을 위한 별도의 광통신망이 구성되어 제어 구간 간에 직접 정보 전송이 가능하다.

1단계 구간에는 총 9개의 신호기계실이 있고, 그중 차량기지에는 2개의 전자연동장치가 설치되어 있다. 전자연동장치 제어 구간 간의 통신망은 차량기지 내 2개 제어 구간과 인천국제공항역 전자연동장치 제어 구간을 연결하는 광통신망 2와 인천국제공항역과 나머지 7개의 전자연동장치 제어 구간의 인접 제어 구간 간 통신을 담당하는 광통신망 1로 분리되어 있다. 그림 1은 공항철도 본선 및 차량기지의 신호시스템 구성도이다.

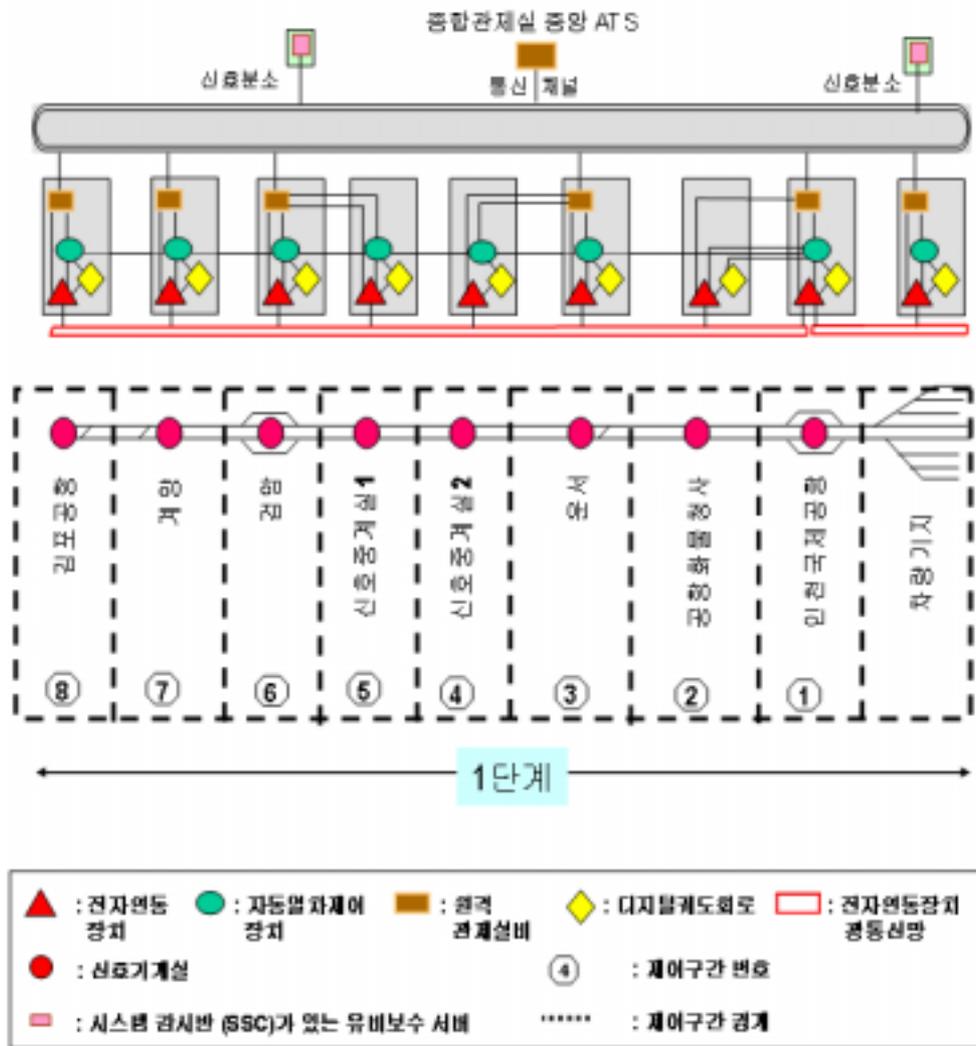


그림 1. 공항철도 본선 및 차량기지 신호시스템 구성

2.2 RAM 예측 방법

명확한 분석을 수행하기 위해서 분석에 앞서, 분석 범위의 한정 및 기본 개념의 정의가 우선 될 필요가 있다. 본 논문의 RAM 분석은 공항철도 1단계 구간, 전자연동장치 하부설비에 한정하여 수행하였다.

분석의 대상이 되는 고장에 대하여는 시스템이 주어진 기능을 수행하지 못하는 상태로 정의하였고, 주어진 고장률로부터 식 (1)을 사용하여 평균고장시간(MTBF: Mean Time Between Failure)을 산출하였다.

$$MTBF(Hr) = \frac{1}{\lambda} \quad (1)$$

여기서, λ 는 우발고장기간 중의 고장률을 의미하며 상수 값을 갖는다.

고장을 조치하는데 소요되는 시간은 평균고장조치시간(MTTR: Mean Time To Restore)으로 정의한다. 가용성의 지표가 되는 가용도(Availability)는 운영조건에서 주어진 시간동안 해당 기능을 수행할 확률로 정의되며, 식 (2)를 통해 산출된다.

$$A(\%) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100 \quad (2)$$

여기서, A는 가용도를 의미한다.

고장은 열차 운행 또는 시스템의 가용성에 영향을 준 심각도에 따라, 표 1과 같이 2가지 등급으로 분류하였다.

표 1. 고장 등급 분류

심각도 수준	등급	영향(지연)
중대 수준	G2	신호 시스템 전반 혹은 주요 기기의 기능이 상실됨 (5분 이상의 서비스 중단 혹은 지연)
경미 수준	G1	서비스 중단이나 지연 없이 단지 신호 시스템의 일부 기능이 손상됨. 단, 유지보수원의 조치는 필요함.

고장의 영향에 대한 평가는 고장 유형, 영향 및 위험도 분석(FMECA: Failure Mode Effects and Criticality Analysis)을 통해 시행하였다.

2.3 전자연동장치 FMECA

전자연동장치에 대한 FMECA는 열차 운행 혹은 신호시스템의 운영에 영향을 줄 수 있는 전자연동장치의 모든 고장과 그 영향을 파악하기 위해 수행된다.

고장 유형, 영향 및 위험도 분석의 적용을 위해, 우선 전자연동장치의 하부 설비를 분류하여 각 설비별 고유 기능을 파악하고 고장 유형, 즉 시스템이 주어진 기능을 정상적으로 수행하지 못하는 상황에 대해 정의하여야 한다. 다음으로 정의된 고장이 전자연동장치 및 신호시스템의 기능에 미치는 영향을 예측하여 중대 수준(G2) 혹은 경미 수준(G1)으로 분류하고 해당 고장이 발생하였을 때의 조치방안과 고장률을 제시한다.

표 2는 전자연동장치 하부 설비에 대한 FMECA의 적용 예이다. 고장률은 해당 부품의 기실적 데이터와 MIL HDBK 217F에서 제시되고 있는 값을 참조하여 사용하였다.

표 2. 전자연동장치 FMECA 적용 예

	하부 설비 기능 / 설비	고장유형	고장 영향		조치방안	등급	고장률
			전자연동장치	신호시스템			
1	연동 논리부 모듈 전원 공급 / 연동논리부	전원 공급 불가	동작계 기능 중단, 대기계로 절체 운행	영향 없음	동작계 장애 발생 시 즉시 자동절체됨. 고장난 보드를 교체함	G1	4.43 E-06
2	확인모듈과 출력모듈 간 인터페이스 / 연동논리부	출력 레벨 정보 불가	동작계 기능 중단, 대기계로 절체 운행	영향 없음	동작계 장애 발생 시 즉시 자동절체됨. 고장난 보드를 교체함	G1	3.10 E-06
3	하부 모듈 상태 감지 / 연동논리부	상태 감지 장애	동작계 기능 중단, 대기계로 절체 운행	영향 없음	동작계 장애 발생 시 즉시 자동절체됨. 고장난 보드를 교체함	G1	2.31 E-06
4	동작계와 대기계의 동시 활성화 여부 감시 / 절체부	동시 활성화 감지 실패	전자연동장치 기능 중지	전자연동장치 해당 제어 구간 운행 열차 중지	장애 예방을 위한 주기적 유지보수 절차 확립	G2	1.09 E-06
5	인접 전자연동장치 간 통신 / 광통신부	인접 연동 제어 구간 정보 수신 불가	기능 저하 모드 운영	영향 없음	수동 절체 취급. 고장난 보드를 교체함.	G1	4.43 E-06

2.4 전자연동장치 RAM 예측

전자연동장치는 연동로직 연산, 각종 입출력 수행, 동작계와 대기계 간 절체 등의 기능을 수행하는 장치이다. 본 논문에서는 신뢰도 분석을 위해 전자연동장치의 모든 고유기능 중 한 가지 이상의 문제가 발생하였을 경우를 고장상태로 고려하였다. 그림 2는 전자연동장치 하부 설비 및 각 제어 구간 간의 통신을 고려하여 작성한 신뢰성 블록도(RBD: Reliability Block Diagram)이다.

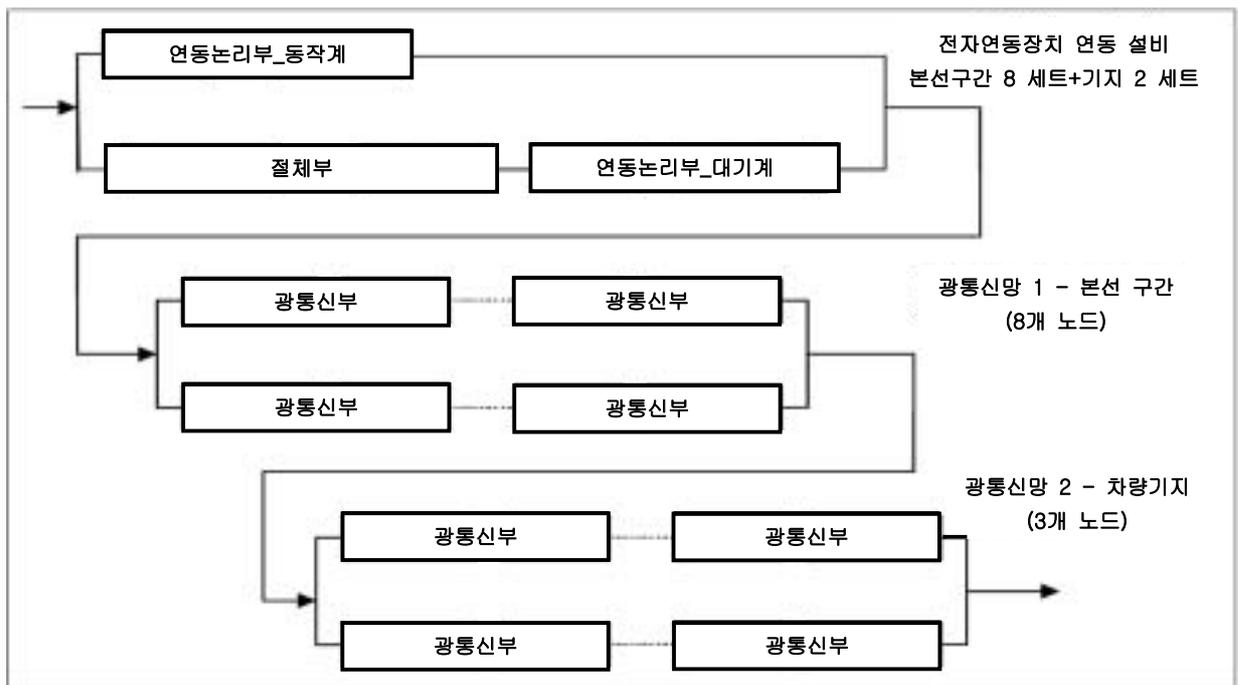


그림 2. 전자연동장치 신뢰성 블록도

절체부에 고장이 발생할 경우, 열차 운행 및 시스템 운영과 관련한 전자연동장치의 고유 기능은 중단 없이 정상적으로 수행되지만, 계간 절체는 불가능해 진다. 때문에 절체부의 고장 발생 후 연동논리부_동작계에 고장이 발생 하면, 연동논리부_대기계가 정상적 기능을 수행할 수 있음에도 불구하고 전체 전자연동장치 연산 동작이 중단되는 결과가 초래되게 된다.

광통신부는 인접 전자연동장치 간의 광통신망을 구성하는데, 한쪽 통신부에 고장이 발생할 때 다른 쪽 통신부로 절체되는 구조가 아니라 두 통신부가 동시에 동작하는 구조로 설계되어 있다. 때문에 두 개의 통신부 중 어느 한 곳에만 고장이 발생할 때에는 시스템 기능에 아무런 영향을 주지 않는다.

본 논문에서 사용된 전자연동장치 구성 설비별 고장률은 다음 표 3과 같다

표 3. 전자연동장치 구성 설비별 고장률

구성 설비	고장률 표기	고장률
연동논리부_동작계	$\lambda_{연동논리부_동작계}$	$2.84E-0.4 \text{ h}^{-1}$
연동논리부_대기계	$\lambda_{연동논리부_대기계}$	$2.84E-0.4 \text{ h}^{-1}$
절체부	$\lambda_{절체부}$	$2.10E-0.5 \text{ h}^{-1}$
광통신부	$\lambda_{광통신부}$	$2.00E-0.5 \text{ h}^{-1}$
연동논리부 공통고장모드	$\lambda_{연동논리부_공통고장모드}$	$1.00E-0.7 \text{ h}^{-1}$
광통신부 공통고장모드	$\lambda_{광통신부_공통고장모드}$	$4.00E-0.7 \text{ h}^{-1}$

(1) 연동 설비 고장률 산출

연동 설비 고장률을 산출하기 위해, 수리 가능한 병렬 구조 시스템의 고장률 연산에 사용되는 다음의 식 (3)을 적용하였다.

$$\lambda_{시스템} = 2 \times \lambda_{병렬가지 A} \times \lambda_{병렬가지 B} \times MTTR + \lambda_{공통고장모드} \quad (3)$$

전자연동장치 연동 설비는 동작계와 대기계의 2중계로 구성되어 있으므로 한 쪽의 고장이 전체 시스템 동작에 영향을 주지는 않는다. 또한 고장 발생 시 전원을 차단한 후 조치를 시작하는 것이 시스템 안정성 측면에서 바람직하므로 영업 운행이 종료된 후 고장 설비에 대한 조치를 시행하도록 하고 있다. 때문에 MTTR은 고장 조치에 소요되는 순수 작업 시간이 아닌, 고장 발생 후부터 조치가 완료될 때까지의 시간을 모두 합산한 10시간으로 가정하여 식에 적용하였다. 실제 위 식 및 조건에 의해 인천국제공항역을 포함한 본선구간과 차량기지의 전자연동장치 연동 설비의 고장률을 구해보면 식 (4), (5)의 결과와 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_{본선 \text{ 연동 설비}} &= 8 \times \{ 2 \times \lambda_{연동논리부_동작계} \times (\lambda_{절체부} + \lambda_{연동논리부_대기계}) \times MTTR + \lambda_{연동논리부_공통고장모드} \} \\ &= 1.47E-0.5 \text{ h}^{-1} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{기지 \text{ 연동 설비}} &= 2 \times \{ 2 \times \lambda_{연동논리부_동작계} \times (\lambda_{절체부} + \lambda_{연동논리부_대기계}) \times MTTR + \lambda_{연동논리부_공통고장모드} \} \\ &= 3.67E-0.6 \text{ h}^{-1} \end{aligned} \quad (5)$$

(2) 광통신망 고장률 산출

광통신망의 고장률을 산출하기 위해, 동일 장치로 구성되어 있고 수리가 가능한 병렬 구조 시스템의 고장률 연산에 사용되는 식 (6)에 공통원인고장을 추가로 고려한 식 (7)을 적용하였고, 그 결과는 식 (9)와 식 (10)에 나타내었다. 광통신부 공통고장모드는 식 (8)에 의해 산출되었다.

$$\lambda_{시스템} = 2 \times \lambda_{병렬가지}^2 \times MTTR \quad (6)$$

$$\lambda_{\text{광통신망}} = 2 \times (\lambda_{\text{광통신부}} \times \text{노드 수량})^2 \times \text{MTTR} + \lambda_{\text{광통신부_공통고장모드}} \quad (7)$$

$$\lambda_{\text{광통신부_공통고장모드}} = 0.02 \times \lambda_{\text{광통신부}} \quad (8)$$

여기서, 노드 수량은 광통신망 1의 경우 8, 광통신망 2의 경우 3이다.

$$\lambda_{\text{광통신망 1}} = 2 \times (2.00\text{E-}0.5 \text{ h}^{-1} \times 8)^2 \times 10 + 4.00\text{E-}0.7 \text{ h}^{-1} = 9.12\text{E-}0.7 \text{ h}^{-1} \quad (9)$$

$$\lambda_{\text{광통신망 2}} = 2 \times (2.00\text{E-}0.5 \text{ h}^{-1} \times 3)^2 \times 10 + 4.00\text{E-}0.7 \text{ h}^{-1} = 4.72\text{E-}0.7 \text{ h}^{-1} \quad (10)$$

(3) 전자연동장치 RAM 예측 결과

전자연동장치의 연동 설비와 광통신망에 대한 고장률의 산출 결과를 이용하여 전체 전자연동장치의 고장률 및 평균고장시간과 가용도를 구하면 다음의 식 (11), (12), (13)과 같다. 표 4는 전자연동장치의 각 하부 설비 및 전체 장치에 대한 RAM 예측 결과를 요약한 것이다.

$$\lambda_{\text{전자연동장치}} = \lambda_{\text{본선 연동 설비}} + \lambda_{\text{기지 연동 설비}} + \lambda_{\text{광통신망 1}} + \lambda_{\text{광통신망 2}} = 1.98\text{E-}0.5 \text{ h}^{-1} \quad (11)$$

$$\text{MTBF}_{\text{전자연동장치}} = 50633 \text{ Hr} \quad (12)$$

$$A_{\text{전자연동장치}} = \frac{\text{MTBF}_{\text{전자연동장치}}}{\text{MTBF}_{\text{전자연동장치}} + \text{MTTR}} \times 100 = 99.9803 \% \quad (13)$$

표 4. 전자연동장치 RAM 예측 결과 요약

하부 설비	고장률(λ)	평균고장시간(MTBF)	가용도(A)
본선 연동설비	$1.47\text{E-}0.5 \text{ h}^{-1}$	68027 Hr	99.9853 %
기지 연동설비	$3.67\text{E-}0.6 \text{ h}^{-1}$	272480 Hr	99.9963 %
광통신망 1	$9.12\text{E-}0.7 \text{ h}^{-1}$	1096491 Hr	99.9991 %
광통신망 2	$4.72\text{E-}0.7 \text{ h}^{-1}$	2118644 Hr	99.9995 %
전자연동장치	$1.98\text{E-}0.5 \text{ h}^{-1}$	50633 Hr	99.9803 %

3. 결 론

본 논문에서는 공항철도 전자연동장치에 대한 고장률, MTBF 및 가용도에 대한 분석을 수행하였다. 공항철도는 예방정비 및 사후정비를 통해 발견, 조치된 모든 고장을 자체적으로 구축한 고장 보고, 분석 및 조치 체계(FRACAS: Failure Reporting, Analysis and Corrective Action System)를 통해 표준화, 전산화 하여 관리하고 있으며, 이러한 정보들은 RAM 분석을 위한 기본 자료가 된다. 이에 전자연동장치의 RAM 예측 결과는 공항철도가 지속적인 RAM 분석을 수행함에 있어 유용한 비교 자료가 될 것으로 기대하고 있다.

공항철도는 향후 지속적인 고장 및 RAM 지표 분석을 통해 유지보수 절차와 비용을 최적화하는 것을 목표로 하고 있다.

참고문헌

1. Incheon International Airport Railroad Co. Ltd and Incheon Korean French Consortium-INCHEON INTERNATIONAL AIRPORT RAILROAD FACILITIES-Exhibits A, B, C and D.

2. EN50126, Railways applications- The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS), 1999.
3. MIL HDBK 217F, Military Standard- Reliability Predictions for electronic