무선기반 열차제어시스템의 성능평가 방안

Performance Evaluation of Radio-based Train Control System

조봉관† 황현철* 류상환** 홍재성*

Cho, Bong-Kwan Hwang, Hyun-Cheul Ryu, Sang-Hwan Hong, Jai-Sung

ABSTRACT

LRT System Application Project is performed for the purpose of technical advancement and stabilization of K-AGT system from the viewpoint of practical use and commercialization. For those purpose, the performance test and evaluation procedure for signaling system are developed, and the scheme of verifying the performance and function of signaling system under multi-train and driverless control environment is being conducted.

In general, the railway have kept their systems highly safe and reliable through the ongoing efforts over a period of many years. This has been achieved primarily by continuous improvements, which mean that there is a dearth of experience in the introduction of innovative new systems. Therefore it is said that comparing a new system that features a completely new architecture with a conventional one may be difficult. In this paper, we investigate the evaluation method for Radio based-Communication Based Train Control system from case study.

1. 서론

철도 기술의 역사는 백년 이상을 거슬러 올라가고 기존의 기술을 이용하며 고도로 안전하고 신뢰성 있는 시스템을 유지한다. 이는 장기간의 지속적인 개선을 필요로 하며, 이러한 사실은 철도가 완전히 새로운 시스템을 도입할 경우, 기존 기술과 비교하는 것이 어렵다. 예를 들면 무선 기반 열차제어시스템은 다른 열차제어시스템에 비해 더 가격 효율적이고, 유지보수가 용이하다고 알려졌다. 왜냐하면, 고정폐색시스템인 궤도회로에 의존하지 않기 때문에 유연한 방식으로 열차를 제어할 수 있다. 게다가, 다양한 기능이 추가될 수 있어, 무선 기반 열차제어시스템은 열차 위치를 정확하게 감시할 수 있고 차세대 열차제어시스템의 기본을 형성할 것이라 예상된다. 그러나, 새로운 통신 및 제어 시스템 아키텍처는 (1) 무선 통신 시스템으로 열차 제어, (2) 열차 고속 주행시 실시간 제어, (3) 광범위한 지역을 운행하는 열차의 네트워크 기반 제어를 실현하기 위해 도입되지만 그럼에도 불구하고 다른 아키텍처를 직접적으로 비교하는 것은 부적절하기 때문에 기존 시스템에 대한 우월성을 시연하지 못한 경우가 많다. 한편, 최근 안전성 레벨은 안전성 생애 주기와 안전성 통합 레벨의 새로운 개념에 의존하고 있다. 국제적 표준(IEC 62278)에서는 새로운 열차제어시스템을 평가하기 위해 신뢰성, 가용성, 유지보수 및 안전성(RAMS)개념이 다양한 성능 파라미터의 통합을 통해 새로운 고성능 철도 시스템을 구축하는데 적용된다. 본 논문에서 일본 철도연구소(RTRI)에서 새로운 무선기반 열차제어시스템 평가를 위해 개발한 SIMTRAS 시뮬레이터에 대해 소개하고 이에 대한 안전성 논리 평가방법을 고찰하였다. 또한, 사례연구에서 무선 기반 열차제어시스템이 안전성 측면에서 더 우월함을 보여주고 있다.

† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 경량전철시스템연구단, 선임연구원
E-mail : bkcho@krri.re.kr
TEL : (031)460-5439 FAX : (31)460-5736
* 정회원, 한국철도기술연구원, 경량전철시스템연구단, 선임연구원
** 정회원, 한국철도기술연구원, 경량전철시스템연구단, 책임연구원

2. 열차제어시스템 평가 방안

SIMTRAS 시뮬레이터는 열차제어시스템을 평가하기 위해 개발되었으며, 열차 운행과 이동의 상세한 시뮬레이션을 통해 열차의 서비스 방법론과 제어시스템을 평가한다.

새로운 무선 기반 열차제어시스템의 평가를 시작점으로 제어/운행 및 통신 방식, 실시간성, 통신 네트워크/프로토콜 및 통신 시스템 트래픽에 대한 평가를 수행하고, 전반적인 시스템 성능 평가를 가능하게 한다. 그림 1에서 묘사된 것처럼 열차제어 평가 시뮬레이터(3절, SIMulator for platform of TRAin control System, SIMTRAS)는 열차 운행과 이동을 시뮬레이션하고, 다양한 종합 성능 파라미터를 평가한다. 안전성논리분석시스템(4절, RiskNet)은 통신시스템을 평가하는데 이용되는 통신시뮬레이터(5절, Network Simulator 2, NS2)와 함께 안전성 논리 성능을 평가한다.

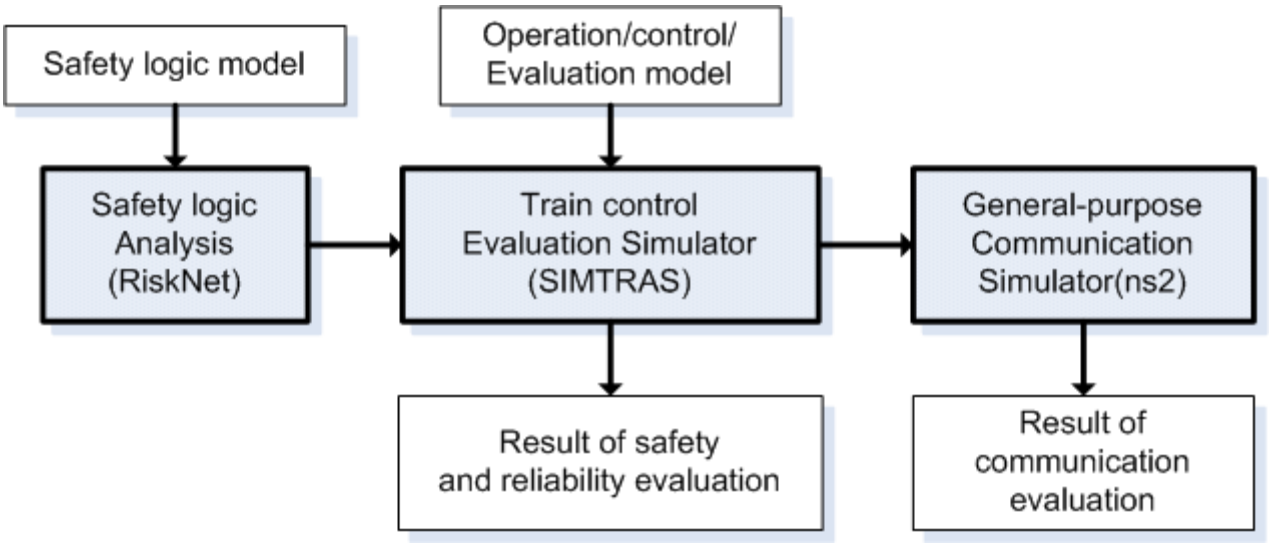


그림 1. 열차제어 평가시스템 개요

3. 열차 제어 평가 시뮬레이터

3.1 열차 제어 평가 시뮬레이터의 특징

완전히 새로운 무선 기반 열차제어시스템 성능을 평가하고자 한다면, 제어/운영 방법, 통신 시스템 및 통신 네트워크 프로토콜의 실시간성을 평가할 필요가 있다. 그러므로, 동시에 진행되는 사건의 시간 사이의 관계만이 아니라 대응하는 기하학적 관계까지 대표할 수 있다.(SIMTRAS 시스템)

3.2 시뮬레이션 제어

시뮬레이터는 event-driven 형식이며, 시뮬레이터의 주요 목적은 시간과 장소라는 분리된 데이터베이스를 사용하여 실행되는 두 개의 스케쥴러(하나는 시간 다른 하나는 위치)를 가지고, 열차 운행/이동을 시뮬레이션하는 것이다. 시간 사건(열차 출발, 무선 통신 시간 등)에 대한 시간 데이터베이스를 가지는 시간 스케쥴러는 다음 사건을 선택하고 수행한다. 이 스케쥴러는 단 하나의 사건이 어느 한 순간에 집행됨을 보장한다. 두 개 이상의 다른 사건이 동시에 집행되면 먼저 계획된 사건(사건이 동시에 예정된 경우 먼저 시작된 사건)이 우선권을 가진다. 반면, 위치 스케쥴러는 위치 데이터베이스에 열차 와역 위치를 가지고 있고 사건의 진행에 따라 다음 사건을 선택하고 진행한다.

3.3 평가 목적

실시간성 아키텍처, 열차제어 메커니즘의 안전성과 신뢰성은 물론 그들의 인덱스 기반 관리 방법론까지 평가하였다. 즉, 열차 운행, 신호 시스템(이동 폐색 방식의 시스템 등), 통신 네트워크 구성(통신처리속도를 포함), 통신 프로토콜, 실시간 운행을 위한 제어 방식 등에 초점을 맞췄다. 철도에서 열차 제어와 주로 관련된 평가 측정은 아래와 같다.

(1) 해저드 평가

해저드 : 사고를 일으키는 것 같이 인명이나 재산에 잠재적으로 위험한 물리적 상황으로 안전성 측정을 위해 아래 해저드의 risk를 계산했다.

(a) 열차 간 충돌, 탈선, 충돌 유해성(다른 것 보다는 열차 간)
(b) 승강장-열차 인터페이스
(c) 철도 건널목
(d) 자연 재해 및 기타

(2) 신뢰성

철도시스템 장애나 안전 시스템 작동에 따른 시스템 작동 정지로 야기된 역에서의 열차 출발 지연에 초점을 맞췄다.

(3) 실시간성

유효기간이 있는(예를 들면, 전송 후 몇 초) 메시지를 전송하는 실시간 제어 시스템을 가정하고, 메시지 유효성 때문에 실행 기간이 정해진 때를 넘기는 초과의 가능성에 대해 생각했다. 또한 앞에서 언급한 실시간 제어 시스템으로 인한 계획되지 않은 열차 정지로 인한 전반적 열차 지연에 대해 고려하였다.

4. 안전성 논리 분석

4.1 안전성 통합 레벨에서 안전성 관리

높은 안전성 여유를 가질 것이 요구되는 시스템은 보통 새로운 안전성 생애 주기 및 안전성 통합 레벨 개념에 기초한 안전성 관리 방법론을 포함시킨다. 안전성 생애 주기 방법론은 개념 설계, 설계, 제작, 운행은 물론 유지보수, 개선 주기를 안전성 생애 주기로 정의하고 매 주기에 안전성 관리 활동 정의를 포함하는 안전성 관련 시스템의 개발 과정을 의미한다.

안전성 통합 레벨은 발생률과 해저드 결과로 표현되는 리스크로 정의된다. 기술적 요구사항은 요구되는 안전성 레벨에 따라 선택된, 안전성 통합 레벨과 함께 정의된다.

안전성 관리 활동은 아래와 같다. 우선, 안전성 분석으로 기본 시스템 명세서가 정의되고, 해저드가 열거된다. 그 후 해저드 분석은 해저드의 구성요소와 구성을 명기하기 위해 수행된다. 또한 리스크 분석은 시스템의 안전성 수준을 평가하기 위해 수행된다.

다음으로, 안전성 요구사항 명세서가 리스크 분석의 결과에 기초하여 정의될 것이다. 안전성 요구사항 명세에서 요구되는 안전성 레벨을 달성하기 위해 필요한 목표 안전성 통합 레벨과 기능은 정의되어야만 한다.

4.2 안전성 분석 절차

앞의 절에서 언급된 안전성 생애 주기 활동에서 이용되는 안전성 분석 방법은 아래와 같다.

(1) 해저드의 열거

시스템 구성을 분명히 하고 모든 유해성을 고려하기 위해 시스템 구성이 정의되고 해저드가 열거된다.

(2) 해저드 정의

분석된 해저드는 양적 평가 및 질적 분석으로 정의된다.

(3) 안전성 논리의 정의

안전성 측정은 개별 특정 해저드에 따라 분명하게 정의된다.

4.3 네트워크형 안전성 평가 모델

일반적으로 앞에서 언급한 안전성 분석 절차를 위해, 안전성 시스템 구성이 주로 논리 모델로 다루어진다. 안전성 평가 영역에서, 이벤트 트리(ET)와 오류 트리(FT) 분석 모델이 논리 모델로 주로 이용된다. 그러나 트리 형태 논리 표시가 이용되는 경우 명백하게 정의되지 않은 상태 사이의 관계 문제가 나타난다. 이러한 문제를 극복하기 위해 새로운 네트워크형 신뢰성 모델로 유형화된 상태 영향 도표(TSID, 그림 2)를 RTRI에서 개발하였다.

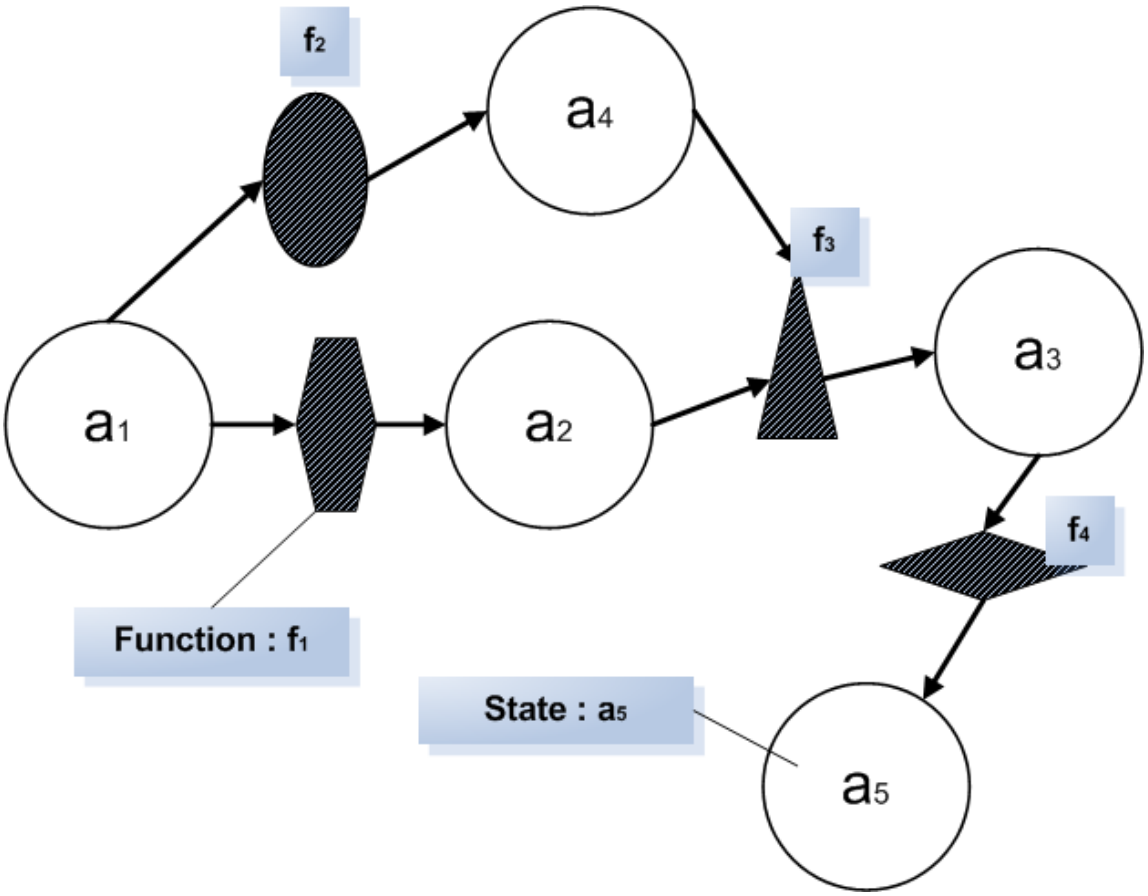


그림 2. TSI(Typed State Influence) 다이어그램

네트워크형 신뢰성 모델은 안전성 평가 모델에 대한 설명을 제공하기 위해 도입되었다. 또한, 이 모델은 개별 시스템 상태 관계를 명백하고 직접적으로 정의한다. 일반적인 기능적 관계는 이 모델의 운영자로써 정의될 수 있다.

안전성 논리를 분석하기 위해 논리평가시스템을 이용하였으며 안전성 논리 데이터가 안전성 논리 분석 시스템(RiskNet)으로 분석될 것이다. SIMTRAS 열차제어평가시뮬레이터가 이 분석 결과를 BDD 모델 형태로 받아서 열차 제어/운행 시스템의 종합적 안전성을 분석하였다.

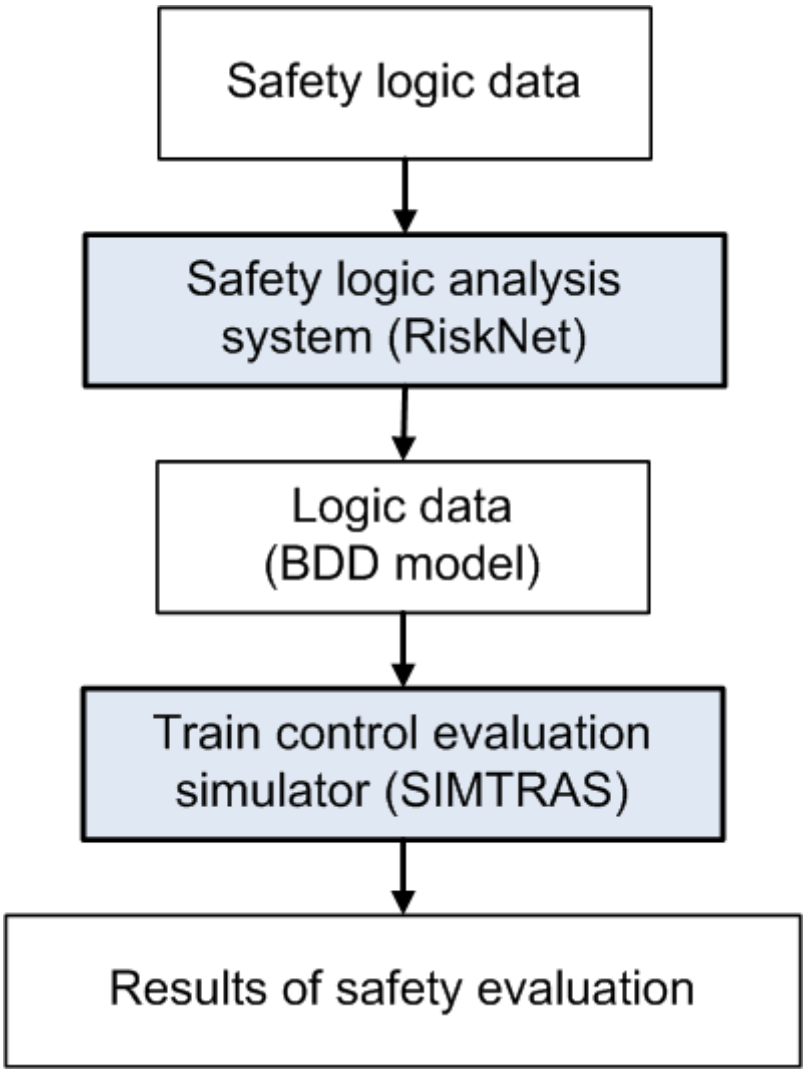


그림 3. 안전성 로직해석 시스템과 열차제어평가 시뮬레이터간의 인터페이스

5. 통신 시스템의 실시간성 평가

5.1 통신 시뮬레이터 : NS2

통신 모델은 일반 1989년 REAL 네트워크 시뮬레이터에서 유래하고, 1995년 U.S Defense Advanced Research Projects Agency(DARPA) 프로젝트로 지원받은 통신 네트워크 연구를 위해 개발된 불연속 사건 시뮬레이터이고 일반 목적 통신 시뮬레이터인 Network Simulator 2(NS2) 시스템을 이용하여 평가된다. 최근 몇 년간, 다른 DARPA 프로젝트에 의해 지원받았고 U.S National Science Foundation(NSF)에 의해 수행되었다. 지난 몇 년 동안 유선/무선 통신(지역 및 위성) 네트워크, 루팅, 멀티캐스트 프로토콜의 전송 제어 프로토콜(TCP) 시뮬레이션을 지원하는 시스템에서 중요한 진전이 있었다.

5.2 NS2 와의 협력

간단히 말해서, NS2 시스템은 열차 운행 시뮬레이터에서 얻어진 열차 이동 로그와 전송(수신) 통신 로그에 기반한 통신을 시뮬레이터한다. 다음 NS2에서 산출된 통신 로그는 통신 시스템을 평가하기 위해 분석된다.(그림 4)

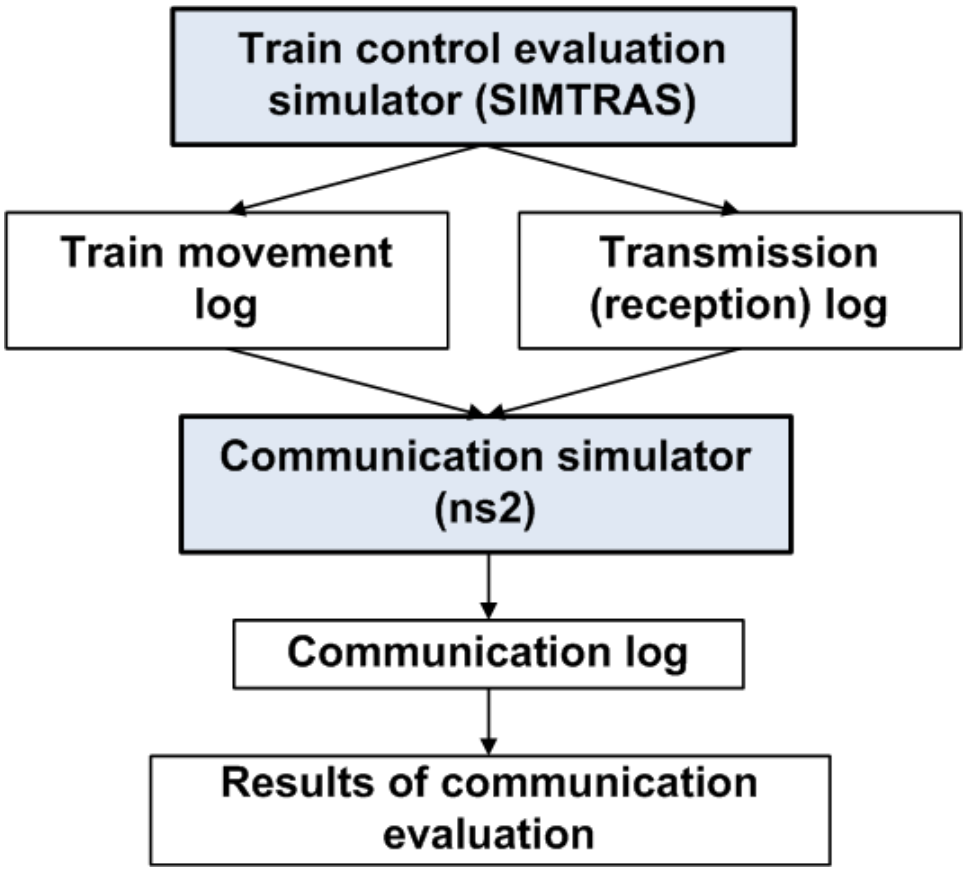


그림 4. 열차제어평가와 통신시뮬레이터간의 인터페이스

6. 사례 연구

6.1 가정

RTRI는 사례 연구를 위해 통근 러시아워 동안 교통 밀집도가 높은 순환형 네트워크의 통근선을 가정하고, 적용된 시스템 구성을 아래와 같이 정의하였다.

(1) 열차제어시스템 :
무선 기반 제어 시스템

(2) 열차 운행 시스템 :
기존 통근선에서 흔하게 찾을 수 있는 것

(3) 위치 감시 시스템 :
자동응답기가 보정하는 주행 기어 rotation의 검지에 기초

(4) 무선 네트워크 :
시간 분할 무선 네트워크

(5) 유선 네트워크 :
기존 LAN 네트워크 신호 시스템에서 쓰이는 것

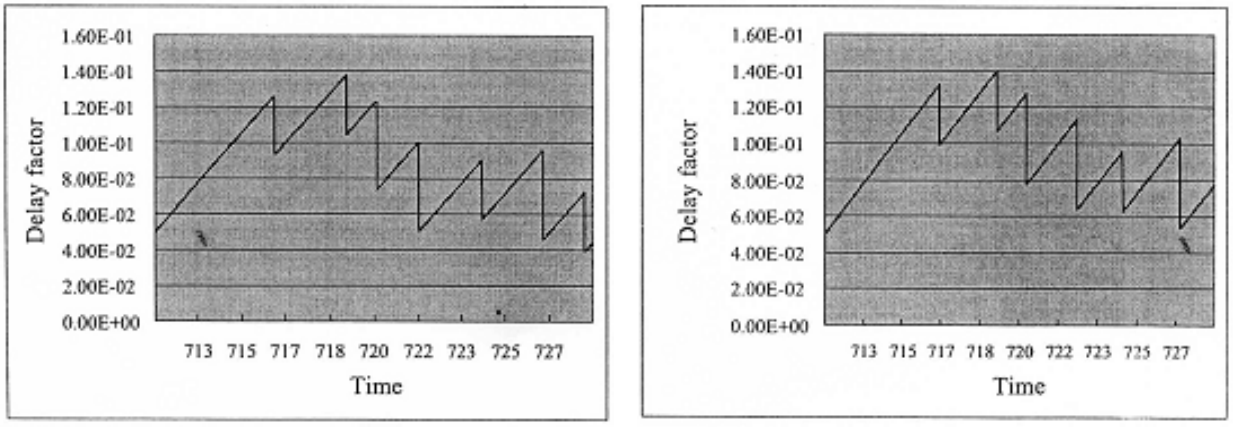
(6) 지상 설비 :
ATC 지상 설비 등과 같이 기존 설비와 같은 것

6.2 안전성 및 신뢰성 평가

앞 절에서 언급된 시스템에서는 아래의 열차 운행을 가정하였다. 운행은 첫 번째 열차부터 정상적으로 시작되며, 오전 6: 50분 경(통근 러시아워의 시작이고 첫 번째 열차에서 2시간 후) 20분 정도 역에서 열차를 지연시키는 상황을 가정했다. 다음의 두 가지 제어 방법을 이용하여 열차 지연에 대한 신뢰성 측정 방법과 열차 충돌에 대한 안전성 평가 방법을 개발하였다.

(1) 통상적인 속도제어
(2) 후속열차의 원활한 제어

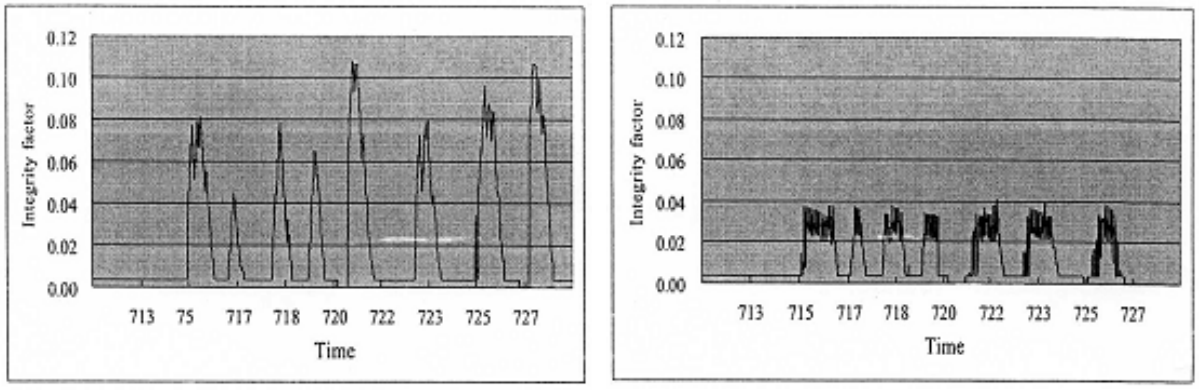
평가된 신뢰성 측정과 안전성 측정 결과는 그림 5와 그림 6에서 알 수 있다. 신뢰성 측정 평가결과에서는 사례(1)과 (2) 모두에서 지연의 차이는 매우 작다. 반면 사례(2)에 대한 안전성 측정은 사례(1)보다 현저하게 낮다.



(1) 통상적인 속도제어 (2) 후속열차의 원활한 속도제어

그림 5. 신뢰성 측정 평가(Time "713"은 7시13분을 의미)

이러한 결과는 일반 궤도회로의 폐색제어(고정폐색시스템)에서 후속열차가 그 폐색구간에서 선행열차의 정확한 위치를 파악할 수 없기 때문에 열차가 최소 안전 여유로 주행하는 일이 생길 수 있음을 의미한다. 반면에, 무선 기반 시스템(이동폐색) 폐색 제어의 경우 후속열차는 언제나 선행 열차의 정확한 위치를 파악하고 안전 여유가 수송 요구사항에 따라 최대한으로 달성할 수 있다. 즉, 무선 기반 열차제어시스템의 제어는 선행 열차 이동에 대한 정확한 정보에 기초하기 때문에 안전성 관점에서 열차를 효율적으로 제어할 수 있다.



(1) 통상적인 속도제어 (2) 후속열차의 원활한 속도제어

그림 6. 안전성 측정 평가(Time "713"은 7시13분을 의미)

6.3 통신 시스템의 실시간성 평가

6.1 절과 같은 가정 하에 첫 번째 열차에서 6:30분경까지 열차혼잡이 상대적으로 가벼운 것을 가정하였다. 열차와 흔히 쓰이는 무선 LAN 시스템의 지상 장비 간의 통신 트래픽을 시뮬레이션하였고, 그 다음 기하급수적 분포 근사값을 이용한 패킷의 통신 지연에 따른 분포 함수(distribution function)를 평가하였다.(그림 7)

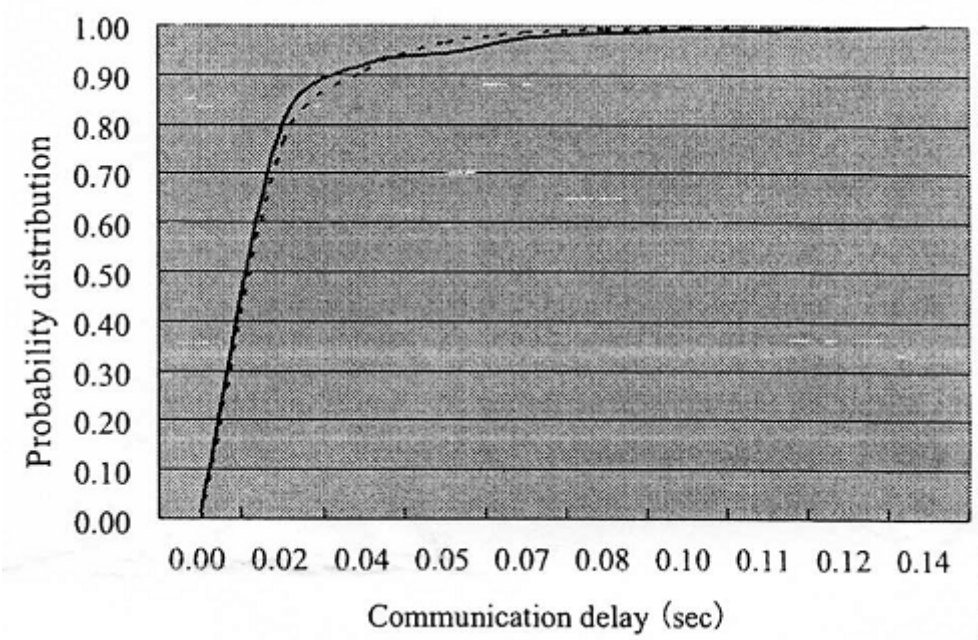


그림 7. 무선통신시스템의 실시간성 평가 결과

7. 결론

종합성능평가 체계는 세계적 표준인 RAMS 인덱스의 출현으로 인해 철도 시스템에 정착되어가고 있다. 본 논문에서 이 틀 안에서 성능 평가 파라미터를 세우고, 무선 기반 열차제어시스템 같은 새로운 아키텍처를 특징으로 하는 열차제어시스템을 평가하는 기술을 소개하였다. 우선, 안전성 논리 분석에서 복잡한 의존성을 대변하기 위해 이용되는 네트워크형 신뢰성 모델 TSID에 기초한 RiskNet 안전성 논리 평가 시스템에 대해 검토하였으며, 열차제어시스템의 다양한 성능 인덱스의 평가에서(특히 무선 기반 열차제어시스템의 새로운 개념을 위해) 실시간성, 안전성 및 신뢰성을 평가하기 위해 SIMTRAS 시뮬레이션 시스템의 개발을 소개하였다. 몇몇 사례 연구가 이런 틀이 새로운 무선통신 기반의 열차제어시스템이 효율적이라는 것을 시연하기 위해 수행되었고 이러한 시스템이 안전성의 관점에서 우월함을 보여 주고 있다.

참고문헌

1. IEC 62278, “Railway Applications - The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS)”, September 2002,(CENELEC EN50126)
2. Iwata, K., "Prospective Safety Analysis of CARAT", RTRI Report, Vol.13, No.8, pp.39-44, 1999
3. Fukuoka, H. "Uncertainty Analysis in Railway Safety Assessment", Quarterly Report of RTRI, Vol.40, No.1, 1999
4. The University of Southern California's Information Science Institute (ISI), "The Network Simulator - ns2", http://www.isi.edu/nsnam/ns