

CBTC 시스템에 대한 시스템 수준의 시험평가 방안 연구

(A Study on the System-Level Test and Evaluation for the CBTC System)

이영훈* · 이재천

(Young-Hoon Lee · Jae-Chon Lee)

요 약

현재 추진되고 있는 무선통신을 기반으로 하는 열차제어시스템 개발 프로젝트에서는 상호운용성 및 상호교환성을 고려하는 하부시스템의 개발을 목표로 하고 있다. 이 프로젝트는 상위 시스템 수준의 설계보다는 주로 하부시스템의 설계에 집중되어 있다. 시스템에 대한 시험평가는 시스템 사양에 대한 만족 여부를 확인하는 것이며, 이에 따라 시스템 수준으로 통합된 시스템 사양서가 필요하다. 본 연구에서는 시스템 사양서가 마련되지 않은 하부시스템의 설계단계에서 최상위 시스템 수준의 시험평가에 대한 방안을 제시하였다.

Abstract

The communication-based train control (CBTC) technology is a kind of railway signaling technologies and is to control the train operation through communication. A project adopting the CBTC technology is in progress and its object is to develop interoperable and interchangeable subsystems. Thus the purpose of this paper is on how to develop the required subsystems and integrate them successfully without sufficient design information at the system level. Accordingly this project shall require the integration and test at the system level. In order to do so, a top-level system specification shall be needed, which is not available in the current phase of the project. The main objective of the test and evaluation activities is to see whether the developed system meets the system specification. In this paper, we describe how the test and evaluation can be carried out based on the subsystems design specifications, considering the system architecture and the operation concept of the existing system as well.

Key Words : Systems engineering(SE), System Integration, TEMP, CBTC

1. 서 론

현재 국내에서 철도기술연구원을 중심으로 통신 기반 열차제어(communication-based train control, CBTC) 시스템 개발 프로젝트가 추진되고 있다. 여기서 CBTC 기술은 통신을 이용하여 열차운행을 제어하기 위한 것으로, 정보통신기술과 융합하여 보다

* 주저자 : 한국철도기술연구원 초고속열차연구실, 선임연구원

Tel : 031-460-5447, Fax : 031-460-5023

E-mail : yhlee@krii.re.kr

접수일자 : 2008년 9월 11일

1차심사 : 2008년 9월 22일

심사완료 : 2008년 10월 31일

효과적인 철도 네트워크를 운영하기 위한 철도신호의 핵심기술이다. CBTC 시스템 개발 프로젝트는 열차제어시스템을 구성하는 하부시스템(subsystem)에 대한 상호운영성 및 상호교환성과 함께, 이를 위한 관련 기술을 확보하는데 있다. 이에 따라 프로젝트는 기존시스템의 운영개념을 기반으로 하여 하부시스템 개발에 집중되어 있으며, 이로 인하여 상위 수준의 시스템 설계보다는 하부시스템에 대한 분석·설계 등에 더욱 노력하고 있다.

일반적으로 상위 수준의 시스템 요구사항이나 사양서 등은 시스템 개발 생명주기의 초기단계인 개념정의단계에서 이루어진다. 프로젝트 진행에 따른 시스템 수준으로의 통합 및 시험, 검증, 확인 등을 위해서 시스템 요구사항을 기반으로 하는 환경이 필요하다. 이와 같이 원활한 프로젝트 성공을 위해서는 프로젝트 생명주기에 있어서 다양한 자원을 효과적으로 통제하기 위한 시스템공학 지원이 필요하다.

시스템에 대한 시험계획은 일반적으로 시스템 요구사항이 만들어지는 수명주기 초기의 개념설계단계에서 수립되며, 초기의 시스템 사양을 바탕으로 종합시험평가계획서(Test and Evaluation Master Plan, TEMP)가 작성된다[1]. 이 계획서에는 통합된 전체 시스템을 기반으로 하여 시험평가 활동을 기술하며, 시험평가에 대한 요구사항 및 시험의 종류, 시험 절차, 시험을 위한 자원, 관련 계획 정보 등이 포함된다.

CBTC 시스템 개발 프로젝트는 현재 기존 시스템 아키텍처를 기반으로 하는 하부시스템 설계단계에 있으며, 향후 전체 시스템으로의 통합 및 시험을 위해서는 상위 수준의 시스템 요구사항이나 시스템 사양이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 상세설계 단계에서 하부시스템에 대한 설계사양을 바탕으로 최상위 수준의 시스템 시험평가를 위한 방안을 제안하였으며, 시스템 아키텍처 및 기존 시스템의 시스템 운영개념 등과 함께 시스템 수준의 요구사항을 도출하였다. 본 연구에서는 Vitech의 시스템공학 전용도구인 CORE[®] 소프트웨어를 사용하여 프로세스 및 요구사항 등을 구현하였다.

2. CBTC 시스템 개발 프로젝트

2.1 CBTC 시스템 개요

철도에 있어서 열차제어시스템은 열차운행에 대한 안전성을 보장하는 핵심역할을 수행한다. 열차제어는 운행 열차간의 안전거리를 유지하고, 열차가 언제라도 안전하게 동작할 수 있는 속도를 결정하는 원리가 준수되고 있다는 것을 보증하는 일련의 수단이다. CBTC란 Communication-Based Train Control의 축약어로, 통신 및 정보기술을 기반으로 하는 일종의 철도신호기술을 말한다. 이러한 CBTC 시스템은 연속·자동의 열차제어시스템으로 자동열차감시장치(ATS, automatic train supervision) 및 자동열차보호장치(ATP, Automatic Train Protection), 자동열차운행장치(ATO, Automatic Train Operation), 통신망장치(RCN, Radio Communication Network) 등의 하부시스템으로 구성된다. 지상-차상 간의 통신을 통하여 궤도회로와 무관한 열차위치 결정, 고용량의 양방향 데이터 통신, 열차속도 및 시스템 기능에 대한 안전제어 등의 바이탈 기능을 수행한다. 이를 위한 통신에는 유도루프나 무선통신 방식이 있다[2].

열차의 안전거리는 같은 구역 안의 열차에 대한 운행방향, 위치, 속도 등을 바탕으로 결정된다. 일반적으로 운행열차의 위치는 일정 거리로 구분하여 설정된 폐색구간을 통하여 처리된다. 이를 디지털 통신망을 통하여 열차간 간격 단축과 함께 고밀도 운행, 안전성 향상 등을 꾀할 수 있다[2]. 이러한 시스템으로는 ETCS Level 2 및 UGTMS 등을 들 수 있다.

ETCS(European Train Control System)는 유럽 대륙의 철도망에서의 상호운영성을 위한 신호·관리 시스템에 대한 산업표준이다. GSM-R(GSM for Railway) 통신망을 기반으로 관련 정보를 수수하며, 이로써 선로변 신호기 철거가 가능하여 설비투자 및 유지보수 감소가 가능하다[2]. UGTMS (Urban Guided Traffic Management System)는 지하철이나 경전철, 트램 등 도시철도망 운영을 위한 공통의 관리시스템을 마련하기 위한 것이다[3].

CBTC 시스템은 ATP 기능 및 ATO, ATS 기능을 수행한다. ATP 기능은 열차간 충돌 방지, 과속 방지, 기타 위험 상태 등에 대한 안전측동작(fail-safe) 등을 수행한다. 이러한 ATP 기능은 ATO 및 ATS 기능 수행에 우선된다. ATO 기능은 기관사를 대신하여 열차 운전제어를 수행하며, ATP의 보호한계 내에서 이루어진다. ATS 기능은 시스템 상태정보 및 감시 수단을 제공하며, 시스템의 각종 기능에 대한 자동제어를 수행한다[4].

ATP 및 ATO, ATS 기능에 필요한 정보는 지상-차상 간 통신인터페이스를 통하여 전송된다. 데이터 링크는 지상 선로나 고가, 터널 등 CBTC 영역에서 연속된 커버리지를 제공하며, 정해진 성능 요구사항에 무리가 없도록 양방향의 지연이 적어야 한다. 또한 열차제어 메시지에 대한 안전성 및 적시성, 보안성 등이 있는 프로토콜 구조를 가져야 한다. 이와 같은 CBTC 표준에 대해 개발활동은 IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)의 RTVISC(Rail Transit Vehicle Interface Standards Committee), 유럽 UGTMS 콘소시엄, IEC(International Electro-technical Commission) Technical Committee 9, APM(Automated People Mover) Standards Committee, ERTMS(European Rail Traffic Management System) 표준에 대한 AEIF(European Association for Railroad Interoperability) 등과 같은 기관을 중심으로 지속적으로 이루어져 왔다[5].

2.2 CBTC 프로젝트 현황

현재 진행 중인 CBTC 시스템 개발 프로젝트는 상호운영성 및 상호교체성을 확보하는 향후 표준을 마련하기 위한 하부시스템의 개발을 주요 목적으로 하여, 기존 시스템을 바탕으로 CBTC 시스템의 하부 시스템 개발에 집중하고 있다. 현재까지 사용되고 있는 기존 시스템의 경우 해외에서 도입된 시스템이 대부분이며, 적용된 기술도 상이하다. 이는 철도기술의 이해 및 표준화 등 뿐만 아니라 운영, 유지보수에도 어려움으로 작용하여 왔다. 기존 시스템은 본 프로젝트를 통하여 새로 개발되는 시스템으로 개량될

것이다.

본 프로젝트에서는 시스템 개발 주기의 초기 단계에 수행되는 시스템 요구사항 수집, 분석, 시스템 사양서 개발 등과 같은 시스템 공학 활동이 충분하지 않았으며, 따라서 상위 시스템 수준에 대한 시스템 요구사항 등은 기존 시스템 아키텍처를 활용하여 보완한다.

2.3 종합시험평가계획서(TEMP)의 필요성

평가의 주요 목적은 시스템이 궁극적으로 의도하는 대로 동작한다는 것에 대한 확신을 갖기 위한 것이다. 이를 위하여 전체가 통합되어 수행되는 시험 평가를 위한 포괄적인 계획이 필요하다. 이러한 시험계획은 일반적으로 초기 시스템 요구사항이 도출되는 개념설계 단계에 시작되며, 시스템 요구사항에 만족함을 보이도록 전체 시스템에 대한 확인(validation)이 가능한 방안을 마련하여야 한다[1].

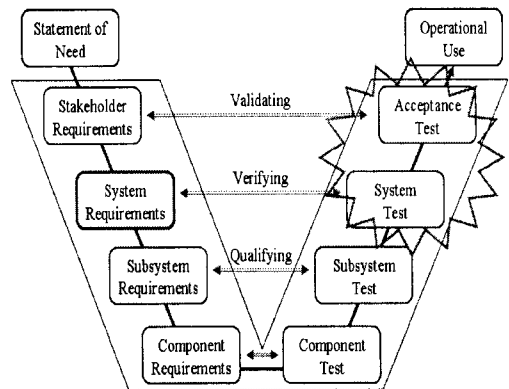


그림 1. Vee 모델에서의 TEMP 위치
Fig. 1. TEMP on the 'Vee' Cycle

종합시험평가계획서에는 시험평가에 대한 요구사항 및 시험 종류, 시험 절차, 시험 자원, 임무 등과 함께 일정, 조직, 책임, 비용 등 관련 정보가 포함된다. 이들은 전체적으로의 통합을 기반으로 시험평가 활동을 다루며, 전체 시스템에 대한 시험 요구사항을 하나로 통합하는 것도 이러한 계획의 주요 목적중의 하나이다. 그림 1은 시스템 엔지니어링의 Vee 모델로, 종합시험평가계획서의 역할을 보여준다.

현재 개발중인 CBTC 시스템은 ATS, ATP, ATO, 전자연동장치(Electronic Interlocking Equipment, EIE), RCN 등 크게 5개의 하부시스템으로 구성된다. 따라서 5개의 하부시스템에 대한 설계사양이 개발되었으며, 이들은 전체 CBTC 시스템으로 통합되어 시험되어야 할 것이다. 시험평가 요구사항은 시스템 사양서를 바탕으로 마련되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 하부시스템의 설계사양서로부터 상위 시스템 수준의 요구사항을 도출하였으며, 시험항목, 시험장소, 시험절차, 시험수행자, 지원 장비, 설비, 자원 등과 같은 요소를 고려하였다. 이러한 항목들은 프로젝트 계획서나 시스템 요구사항, 시스템 아키텍처 등을 참조하여야 한다.

3. 최상위 시스템 수준의 시험방안

3.1 종합시험평가계획서 도출

종합시험평가계획서를 도출하기 위해서는 상위 시스템 수준의 요구사항이 필요하다. 본 연구에서는 프로젝트 산출물인 5개의 하부시스템 설계사양서에서 상위 시스템 시험을 위한 종합시험평가계획서를 작성하는 프로세스를 설계하였다. 이 프로세스를 통하여 5개의 설계사양서를 최상위 문서로서 하나의 상위 시스템 사양서로 통합하고, 기존 시스템 운영

개념을 참조하여 시스템 범위를 정의하였다. 상위 시스템 사양서는 논리적 부분과 물리적 부분으로 구분할 수 있다. 논리적 형상은 시스템 기능 요구사항으로 물리적 아키텍처로 할당하여 매핑시키고, 추적성과 함께 기존 시스템을 참조하여 시스템 아키텍처를 보완하였다. 이러한 시스템 아키텍처를 바탕으로 상위 시스템 요구사항을 검증하였다. 그림 2는 이와 같은 내용을 반영하여 설계된 프로세스 활동에 대한 것이다.

3.2 프로세스 활동 산출물

3.2.1 상위 시스템 사양서

시스템 수준의 사양서는 ATS, ATP, ATO, EIE, RCN 등 5개의 하부시스템에 대한 설계사양을 전체 시스템 범위를 고려하여 하나로 통합하여 상위 시스템 사양서로 생성하였다. 이와 같이 생성된 상위 시스템 사양서를 논리적 형상과 물리적 형상으로 분리하였으며, 이는 CBTC 시스템 아키텍처에 반영되었다.

3.2.2 논리적 형상

시스템 사양서의 논리적 형상은 대부분 시스템에 대한 기능 요구사항을 표현하고 있다. 이를 바탕으로 철도신호전문가의 검토를 통하여 시스템 기능과 논리적 운영동작을 도출하였다. 기존 시스템 운영개념의 참조와 함께 시스템 임무에 대한 논리적 운영 시나리오를 작성하였다. 이들을 시스템 요구사항으로 정리하였다.

3.2.3 물리적 형상

시스템 사양서의 물리적 형상은 시스템의 물리적 요소를 표현하고 있다. 요구사항을 물리적 요소에 매핑시켜 할당하고, 각 요소간의 관계를 고려하여 추적성(traceability)을 설정하였다. 이와 함께 각 시험항목에 대한 검증(verification) 요구사항 및 검증 이벤트를 생성하였다.

3.2.4 상위 시스템 요구사항

상위 시스템 요구사항은 시스템이 만족시켜야 할

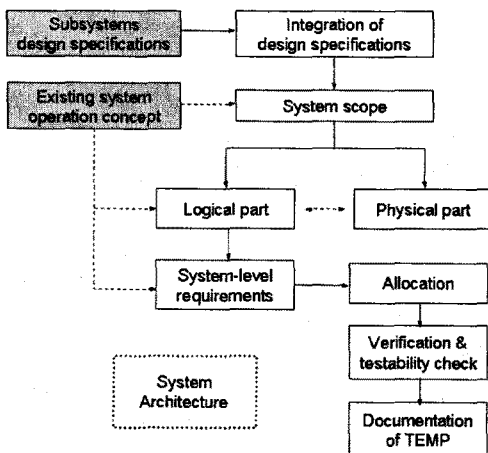


그림 2. 종합시험계획서 작성을 위한 프로세스
Fig. 2. A proposed process to generate the TEMP

사항을 담고있기 때문에 종합시험평가계획서를 작성하기 위한 핵심적인 기본문서에 해당된다. 본 연구에서 상위 시스템 요구사항은 하부시스템의 설계 사양서에서 도출되었다. 논리적 실행동작(logical operation activities) 분석 및 각 요구사항에 대한 시험가능성의 확인을 통하여 시험 항목을 도출하였다. 이와 함께 시스템 임무에 대한 중요한 기술적 요소 및 위험요소를 식별하였다. 각 시험항목에 대해서는 성능기준(TPM)을 설정하였다.

3.2.5 시스템 아키텍처

통합된 상위 시스템 요구사항은 논리적 조망(view) 및 물리적 조망으로 이루어진다. 그림 3에서와 같이 이러한 논리적 조망과 물리적 조망 사이에 관계 특성을 갖는 추적성을 설정하여 시스템 아키텍처를 구성하였다. 또한 상위 시스템 요구사항을 하부시스템에 적절히 매핑하여 연결하고 기존 시스템 운영개념으로 보완하여 검증 요구사항을 수립하였다. 그림 3은 논리적·물리적 조망간의 추적성을 갖는 시스템 아키텍처를 나타내고 있다.

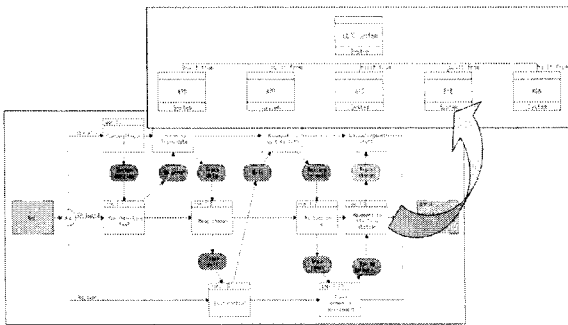


그림 3. 추적성을 설정한 시스템 아키텍처
Fig. 3. System architecture with traceability

3.2.6 종합시험평가계획서 작성

종합시험평가계획서에는 시스템 목적을 만족시키기 위한 주요한 입력 내용을 나타낸다. 종합시험평가계획서에 시험 항목, 시스템 아키텍처, 프로젝트 계획 등과 함께 앞에서 설명한 프로세스 활동 산출물이 포함되도록 하여야 한다. 이들은 시스템 요구사항 검토시 함께 다루어져야 하며, 운영 요구사항에 대한 검증 요구사항과 추적성을 유지하여야 한다.

이를 위해 각 시스템 기능에 대한 검증 요구사항에 검증 이벤트를 할당하였다.

프로젝트 계획서는 프로젝트 수행 및 통제에 대하여 공식적으로 승인한 문서로서, 여기에는 프로젝트 목적, 범위, 예산, 일정 등의 기준선이 포함되어 있다. 또한 프로젝트 목적이 언제, 어떻게 달성되는지에 대한 내용과 함께, 시간선상에서 프로젝트에서 필요로 하는 활동이나 자원 등도 포함되어 있다. 따라서 종합시험평가계획서에 포함되는 시험 일정이나 환경적 요소를 도출하여 반영되도록 프로젝트 계획서의 참조가 필요하며, 이러한 것들로는 시험 장소, 시험 인력, 관련 장비나 설비, 자원 등이 있다.

4. 프로세스 구현 및 산출물 획득

본 절에서는 CORE[®] 툴을 이용하여 구현한 프로세스 및 관련 활동들에 대하여 그 결과와 함께 상세히 설명한다. 프로젝트에서 개발된 5개의 하부시스템 설계사양서를 그림 4와 같이 최상위 시스템 수준의 사양으로 통합하기 위하여 설계사양서에 기술된 시스템 목적 및 기능에 대하여 철도신호전문가의 검토 및 분석과 함께 기존 시스템의 운영개념과 비교하여 보완하였다.

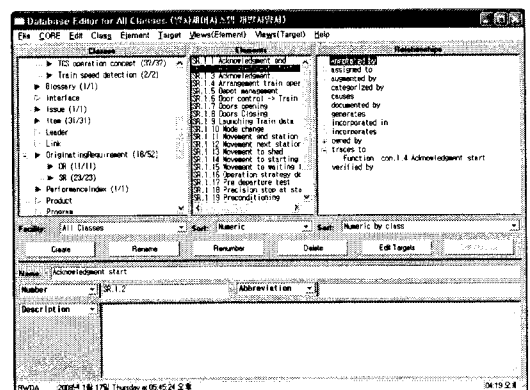


그림 4. 통합된 시스템 수준의 사양
Fig. 4. System-level specification integrated

또한 설계사양서에 나타나는 논리적 형상에서 논리적 실행동작을 도출하여 그림 5와 같이 논리적 운영 시나리오로 정리하였다. 이와 같은 논리적 특성

CBTC 시스템에 대한 시스템 수준의 시험평가 방안 연구

과 통합된 시스템 수준의 사양을 바탕으로 시스템 수준의 요구사항을 추출하였으며, 각각의 시스템 기능에 대하여 시험 가능성을 검토하고, 설정되는 성능기준에 대하여 검증 이벤트와 함께 검증 요구사항을 도출하였다.

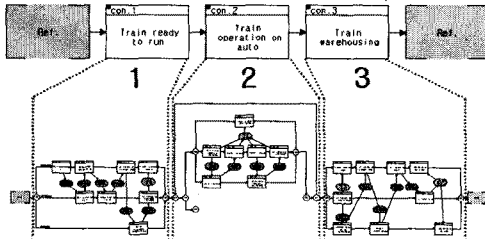


그림 5. 논리적 운행 시나리오
Fig. 5. Logical operation scenario (LOS)

그림 6과 같은 스키마 개체간의 관계에 따라 CORE® 툴을 통하여 각 요구사항과 물리적 요소 사이에 적절한 관계를 할당하여 추적성을 설정하였다. 시스템의 기능은 그 기능을 수행하는 시스템 컴포넌트로 할당시키고, 각 기능은 검증 요구사항에 따라 검증 이벤트를 만족시킴으로써 검증되도록 하였으며, 이들은 모두 그림 7과 같이 각 관계에 따라 추적성으로 연결된다. 이와 같이 시스템 요소간의 추적성을 통하여 사양이나 요구사항에서 변경이 발생하더라도 종합시험평가계획서에 반영시킬 수 있다.

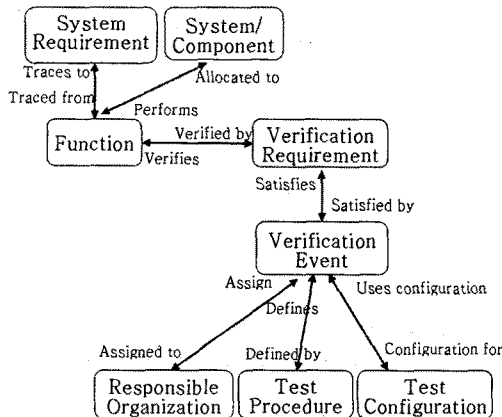


그림 6. 스키마 개체간의 관계
Fig. 6. Schema with the relationships between classes

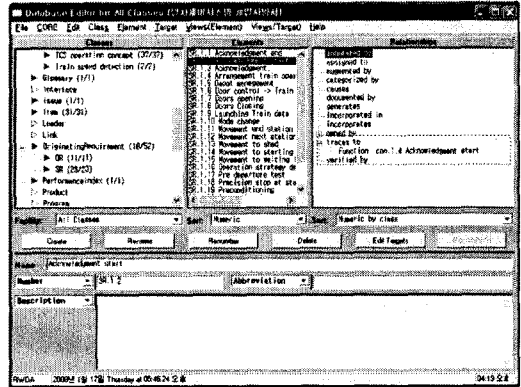


그림 7. 관계에 따른 추적성
Fig. 7. Traceability with the relationships

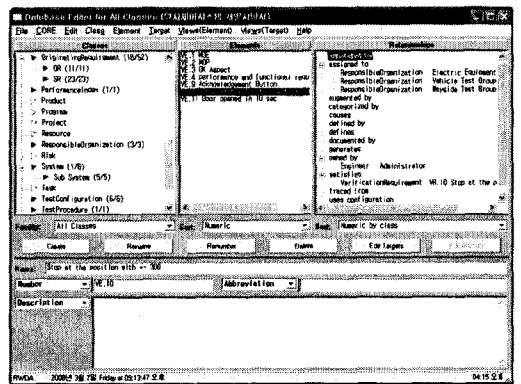
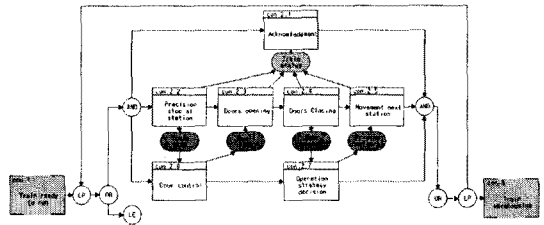


그림 8. 운행 시나리오의 시스템 기능에 대한 예
Fig. 8. Example of system function in LOS

예를 들어, 시스템 기능에 대한 종합시험평가계획서의 시험항목의 '정위치 정차' 기능을 살펴보면, 이 기능은 시스템 수준의 요구사항에서 제시되었으며, 그림 8의 운영 시나리오에 포함된 논리적 운행동작의 하나이다. 이 기능에는 기능 검증을 위한 검증 요구사항에 대한 관계가 설정되어 있으며, 해당되는 검증 이벤트는 '정지위치 ±300[mm] 이내 정차'이다. 그림 9는 이 기능에 설정된 다른 관계를 보여준다.

이와 같이 종합시험평가계획서에는 많은 시험항목이 포함되며, 이와 같은 방대한 문서를 CORE[®] 등과 같은 전용 툴에서 구축된 모델 데이터를 바탕으로 스크립트를 통하여 편리하고 빠르게 출력할 수 있다.

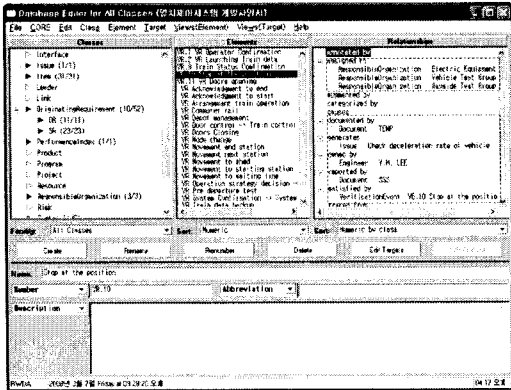


그림 9. 기능에 대한 추적성 관계
Fig. 9. Relationships for the traceability on the function

5. 결 론

시스템 요구사항은 프로젝트 초기단계에 생성되는 가장 중요한 문서이다. 본 논문에서는 시스템 수준의 요구사항을 참조할 수 없을 경우 하위 수준의 사양을 바탕으로 종합시험평가계획서를 도출하는 프로세스를 제안하고, 이로써 시스템 수준의 시험평가가 가능하도록 하였다. 제안된 프로세스는 기존 시스템에 대한 부분적인 개량이나 상세설계 단계에서 시스템 개념을 검증하는 프로젝트 등에 유용할 것으로 판단되며, 아키텍처 프레임워크 등을 통한 시스템 아키텍처를 고려하여 더욱 개선될 수 있다. 아울러 종합시험평가계획서는 시스템 요구사항이나 프로젝트 계획 등이 갱신되는 경우 함께 검토 개정되어야 한다.

References

- (1) B.S. Blanchard, System Engineering Management. 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley, pp. 96-104, 2003.
- (2) M. Aguado, E. Jacob, P. Saiz, J. J. Unzilla, M. V. Higuero and J. Matias, "Railway signaling systems and new trends in wireless data communication," in IEEE 62nd Vehicular Technology Conference 2005, vol. 2, pp. 1333-1336, 2005.
- (3) Y.H. Lee and J.K. Kim, "Trend of Standardization of European Urban Rail Traffic Management System", 2004 Proc. of Autumn Korea Society of Railway, pp. 1266-1273, Korea Society of Railway, 2004.
- (4) IEEE, IEEE Standard for Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements, IEEE Standard 1474.1, 2004.
- (5) E. Kuun and W. Rickard, Open Standards for CBTC and CCTV Radio-based Communication: <http://www.alcatel-lucent.com/wps/portal>, 2004.

◆ 저자소개 ◆

이영훈 (李泳薰)

1964년 5월 29일생. 1987년 2월 전북대 전자공학과 졸업. 1993년 2월 전북대 대학원 전자공학과 졸업(석사). 현재 아주대학교 대학원 시스템공학과 박사과정 수료. 2000년 ~ 현재 한국철도기술연구원 선임연구원.

이재천 (李在天)

1954년 6월 9일생. 1977년 서울대 전자공학과 졸업. 1983년 KAIST 전기및전자공학과 졸업(석사, 박사). 미국 MIT Pos-Doc 수행, California대 (Santa Barbara) 초빙연구원, 캐나다 Victoria대 (BC) 방문교수. 연세대 겸임교수. KIST 책임연구원. 미국 Stanford대 방문교수. 1994년 ~ 현재 아주대 시스템공학과 정교수.