

# 모델기반 시스템 엔지니어링 S/W를 이용한 통신 기반 열차 제어 시스템의 기능 분석에 관한 연구

최민신<sup>1)\*</sup>, 박중용<sup>1)</sup>, 안치경<sup>1)</sup>, 박영원<sup>1)</sup>, 이우동<sup>2)</sup>,

Min-Shin Choi<sup>1)\*</sup>, Joong-Yong Park<sup>1)</sup>, Chi-Kyoung Ahn<sup>1)</sup>, Young-Won Park<sup>1)</sup>,  
Woo-Dong Lee<sup>2)</sup>

1) 아주대학교 대학원 시스템공학과, E-mail : cms1808 @iae.re.kr 2) 한국 철도기술연구원

## ABSTRACT

AGT 시스템은 복잡한 대규모 시스템이며 이 시스템에 도입된 무인운전의 운영 개념은 한국 철도 기술의 환경에서는 처음 시도되는 기술이다. 게다가 신호시스템을 무선 기술을 이용하여 구현해 한다는 요구사항이 추가되어 신호시스템 개발은 더욱 도전적인 문제가 되었다. 이와 같이 실천하기 어려운 요구사항이 많은 무선열차 제어시스템 개발의 위험을 줄이기 위해 시스템공학팀은 전산지원 시스템공학 도구를 사용한 재공학의 개발공정을 수행하도록 하였다. 본 연구에서는 기존의 정적인 데이터모델에 추가하여 시나리오 기반으로 동적거동 분석을 수행하여 기능 모델을 구축하였고 기능 모델을 토대로 한 시스템 아키텍처를 구성하였다. 특히 기능 요구사항의 취약성을 보완하기 위해 CORE의 FFBD(Functional Flow Block Diagram)기능을 활용하여 열차 운행 중 발생할 수 있는 여러 가지 시나리오를 분석함으로써 기능 모델의 완전성의 기여하였다. 이는 정적인 데이터 흐름 다이어그램(DFD:Data Flow Diagram)이 가지는 한계를 모델 기반 시스템공학 도구에서 지원하는 동적인 기능 분석을 수행하여 보완함으로써 모델의 충실도를 높였음을 의미한다. 이를 통해 기능의 오류를 개념단계에서 최소화함으로써 기술 위험이 높은 제품을 개발할 수 있다는 것을 확인하였다.

**Key Words:** Model Based Systems Engineering, Functional Analysis,

Communication Based Train Control, System Design Database

## 1. 서 론

본 연구는 1999년부터 한국 철도기술연구원 주관으로 수행되어온 경량 전철 시스템엔지니어링 체계 분석 사업의 한 분야로서 AGT 시스템의 신호시스템에 대하여 모델기반 시스템엔지니어링을 적용하여 시스템 인터페이스를 구축하는 내용 이다. AGT 시스템은 복잡한 대규모 시스템이며 이 시스템에 도입된 무인운전의 운영 개념은 한국 철도 기술의 환경에서는 처음 시도되는 기술이다. 게다가 신호시스템을 무선 기술을 이용하여 구현해야 한다는 요구사항이 추가되어 신호시스템 개발은 더욱 도전적인 문제가 되었다. 이와 같이 실현하기 어려운 요구사항이 많은 무선열차제어시스템 개발의 위험을 줄이기 위해 시스템공학팀은 전산지원 시스템공학 도구를 사용한 재공학의 개발공정을 수행하도록 하였다. 본 연구에서는 전산지원 시스템공학도구로서 CORE를 활용하였으며 이를 이용하여 이동 폐쇄 무인 운전 시스템 및 하위 시스템의 요구사항 관리 모델을 구축하였으며, 기능 요구사항으로부터 기능 분석을 통한 기능 모델을 구축하였고 기능 모델을 토대로 한 시스템 아키텍처를 구성하였다. 특히 기능 요구사항의 취약성을 보완하기 위해 CORE의 FFBD(Functional Flow Block Diagram)기능을 활용하여 열차 운행 중 발생할

수 있는 여러 가지 시나리오를 분석함으로써 기능 모델의 완전성의 기여하였다. 이는 정적인 데이터 흐름 다이어그램(DFD:Data Flow Diagram)이 가지는 한계를 모델 기반 시스템공학 도구에서 지원하는 동적인 기능 분석을 수행하여 보완하여 모델의 충실도를 높였음을 의미한다. 이를 통해 기능의 오류를 개념단계에서 최소화함으로써 기술 위험이 높은 제품을 개발할 수 있다는 것을 확인하였다.

## 2. 기능분석의 개요

기능분석은 EIA-632에서 언급했듯이 논리적 해결방안을 찾는 데 그 수행 목적이 있다. 논리적 해결방안이란 고객의 요구사항을 만족시키기 위해 개발해야 할 시스템이 어떤 기능과 성능을 가져야 하는가를 물리적으로 구현하기 전에 구축하는 논리적인 해법을 말한다. 이러한 논리적 해결방안은 제시된 요구사항을 검증하는 용도로 쓰이고 또한 새로운 요구사항을 유도해내는 역할을 하기도 한다. 기능분석을 수행하는 구체적인 방법으로는 여러 가지가 있으나, 흔히 시나리오를 작성해서 시스템의 정적 거동을 정의하고 다시 동적인 검증을 거침으로써 마무리한다. 기능분석의 결과물로는 기능의 구조를 보여주는 기능 아키텍처와 거동 다이어그램이

있다.

EIA-632 의 요구사항 논리적 해결방안에서는 다음과 같이 기능분석에서 수행해야 할 업무를 소개하였다[1].

1) 시스템 기술 요구사항에 맞는 해결방안의 추상적인 정의를 위해 하나 이상의 적절한 접근법을 선정하고 구현한다. 선정된 접근법에 대해서, 논리적 해결방안을 정의하는데 도움이 될 아래 2)에서 4)까지의 관련 업무를 완료한다.

2) 다음과 같은 작업을 통해 논리적 해결방안을 설정한다: (1) 대안 비교 분석, (2) 인터페이스, 상태와 모드, 시간선(timelines), 데이터와 제어의 흐름 식별 및 정의, (3) 거동 분석, (4) 고장 모드 분석과 고장 영향 정의

3) 시스템 기술 요구사항(특히, 시스템 기술 요구사항으로부터 나온 성능 요구사항과 제약)을 논리적 해결방안의 요소인 하부 기능, 하부 기능 그룹, 객체, 그리고 데이터 구조 등으로 할당한다.

4) 작업 1)과 2)를 통해 산출된 유도된 기술 요구사항을 식별하고 정의한다. 유도된 기술 요구사항이 논증 절차에 맞게끔 기술되었는지 확인한다.

5) 논리적 해결방안이 논증 절차와 일치하는지 확인한다.

6) 최종적으로 만들어진 논리적 해결방안, 유도된 기술 요구사항, 그리고 할당되지 않은 모든 시스템 기술 요구사항을 출처의 근거 및 가정과 함께 구축되어 있는 정보 데이터베이스(CORE와 같은 소프트웨어를 말함)에 기록한다.

### 3. 기능 아키텍처의 모델링 방법

시스템엔지니어링을 수행함에 있어 기능분석의 목적 및 방법 등이 많이 고찰되어왔고 최근 컴퓨터 기술의 발전으로 모델을 기반으로 하는 시스템엔지니어링이 활성화되었다는 것은 부인 할 수 없는 사실 이다. 그 중에서도 기능분석의 경우 전산지원 도구의 도움을 얻어 더욱 강력한 성능을 발휘하게 되었다. 이 장에서는 기능 아키텍처를 구축하는데 있어 자주 사용되는 세 가지의 정성적인 모델링 방법론인 데이터 모델링, 프로세스 모델링, 그리고 거동 모델링에 대해 소개하겠다. 최근 소프트웨어공학 쪽에서 활용되고 있는 객체지향분석법은 여기서 소개하는 세 가지 방법들을 모두 포함하는 것으로 시스템엔지니어링 분야에서도 점차 그 영역을 확장하고 있는 상황이다.

#### 3.1 데이터 모델링

데이터 모델링은 시스템의 입력과 출력의 관계를 표현하는 것이다. 데이터 모델링을 하는 방법으로 여러 가지가 알려져 있는데 그 중에서도 ER(Entity Relationship) 다이어그램과 Higraphs가 가장 오래되고

기본적인 방법이다. 최근에는 이 두 가지 방법 외에도 IDEF1, IDEF1X 방법이 많이 사용되고 있다. ER은 데이터 실체(Entity) 간의 관계나 데이터 구조를 모델링하는데 쓰이는 것으로 그 개념은 CORE를 비롯한 대부분의 시스템엔지니어링 전산지원 도구 데이터베이스의 기본 개념이기도 하다[2]. 즉, 요구사항, 기능, 컴포넌트와 같은 엘리먼트 간에 어떤 관계(relationship)를 주어 추적성을 확보할 수 있도록 했기 때문이다.

#### 3.2 프로세스 모델링

프로세스 모델링은 시스템 기능의 기능적 분해와 각 기능에 대한 입력과 출력의 흐름을 표현하는 것이다. 프로세스 모델링을 하는 방법으로도 역시 여러 가지가 알려져 있는데 그 중에서도 데이터 흐름 다이어그램과  $N^2$  차트가 많이 사용되고 있다.

1) 데이터 흐름 다이어그램(DFD : Data Flow Diagram)

데이터 흐름 다이어그램은 다이어그램을 활용하는 기술의 원조격으로 특히 소프트웨어와 정보 시스템 개발에 많이 사용된다. 데이터 흐름 다이어그램은 기능이나 활동, 데이터 흐름, 저장소(store), 그리고 종료자(terminator)와 같은 크게 4개의 컴포넌트로 구성된다. Yourdon은 다음과 같이 DFD를 그리는 지침을 제공한 바 있다[3].

첫째, 프로세스, 흐름, 저장소, 종료자에 의미있는 이름을 부여한다.

둘째, 프로세스에 번호를 부여한다.

셋째, 미적인 요소를 고려하여 필요한 만큼 DFD를 재작성한다.

넷째, DFD가 복잡해지는 것을 피한다.

다섯째, 하나의 DFD가 내부적으로 또는 관련 DFD와 일치성을 유지할 수 있게 한다.

DFD는 이미 신호시스템을 분석하는데 활용된 바 있다[24]. 다음 그림은 CBTC 시스템의 기능적인 인터페이스를 DFD로 표현한 것이다.

#### 2) $N^2$ 차트

1960년대에 고안된 방법으로 기능 아키텍처에 있는 기능들의 입력과 출력이 되는 데이터나 아이템을 기술하는데 사용되는 것으로 기능들을 대각선으로 배치한다. 이 차트는 각 기능간의 인터페이스를 명확히 보여주기 때문에 역으로 인터페이스를 갖지 않는 기능들을 식별하는데 큰 도움을 준다. 이 차트는 컴포넌트끼리 최소한의 상호작용을 가질 수 있도록 기능을 컴포넌트에 할당하는데도 사용된다. CORE에서는 기능흐름블록도(FFBD)나 향상된 기능흐름블록도(EFFBD::Enhanced FFBD)를 작성하게 되면 자동적으로  $N^2$  차트가 생성된다. 다음 그림은 EFFBD를 그림으로써 얻어진 CBTC

시스템의  $N^2$  차트이다.

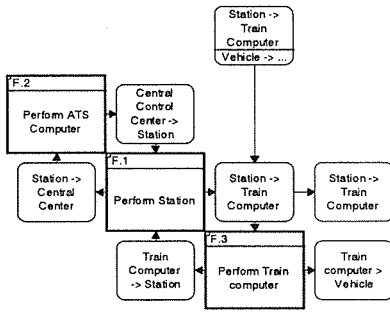


그림 1. CBTC 시스템  $N^2$  차트

### 3.3 거동 모델링

거동 모델링은 시스템의 성능 요구사항을 만족시키기 위해 필요한 시스템 기능을 제어, 활성화 및 종료를 정의하는 것이다. 즉, 시스템의 동적인 면을 점검하는데 주로 사용된다. 거동 모델링을 하는 방법으로 여러 가지가 알려져 있는데 그 중에서도 기능흐름블록도(FFBD : Function Flow Block Diagram), 거동 다이어그램(Behavior Diagram), 상태 차트(Statecharts), Petri nets 등이 있다. 여기서는 FFBD와 거동 다이어그램에 대해서 간단히 소개한다.

#### 1) 기능흐름블록도 (FFBD : Function Flow Block Diagram)

FFBD는  $N^2$  차트와 함께 시스템의 기능을 분해하는데 주로 사용된다. 그러나, CORE 같은 전산지원 도구는 FFBD나  $N^2$  차트 중에서 하나만 작성하면 나머지를 자동으로 생성해주기 때문에 별도의 작업을 할 필요는 없다. FFBD는 시스템 기능의 계층적 분해도를 보여주며 동시에 각 분해 수준에서 기능이 실행될 수 있는 차례를 서술하는 통제 구조를 제공한다. 여기에는 AND나 OR 같은 논리 회로가 사용되는데 여기에 반복, 루프와 같은 논리 회로가 추가된 것이 향상된 기능흐름블록도(Enhanced FFBD)이다. EFFBD는 다음에 설명할 거동 다이어그램과 거의 유사한 기능을 수행한다. 본 과제에서는 기능분석을 수행할 때 EFFBD를 기본으로 하였다. 정적으로 EFFBD를 작성하고 이를 시뮬레이션해봄으로써 거동을 검증할 수 있다는 점에서 데이터 흐름 다이어그램보다 우위에 있다.

#### 2) 거동 다이어그램(Behavior Diagram)

거동 다이어그램은 1970년대 후반 미국방부의 분산형 컴퓨터 설계 시스템의 한 부분으로서 개발된 것이다. 거동 다이어그램의 기능은 FFBD와 거의 유사한데, 거동의 흐름을 세로 방향으로 표현했다는 점이 다르다.

### 3. CBTC 정적 기능 아키텍처 모델

그림 2와 같이 CBTC 시스템의 모든 기능 분석을 DFD를 그려서 수행하였다[4]. 그러나, DFD는 거동 모델링을 할 수 있는 기능이 없다는 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 거동 모델링을 시도하였다.

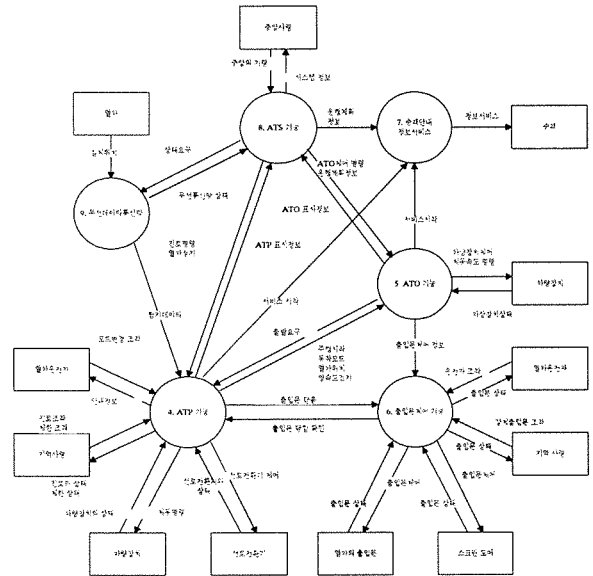


그림 2. CBTC 시스템의 기능적인 인터페이스

### 4. CBTC 동적 기능 아키텍처 모델

#### 4.1 상향식 및 하향식 기능분석

이전 연구 결과 얻어진 데이터 흐름 다이어그램을 토대로 하부 구조의 거동 시나리오를 작성한 후 이를 CORE를 활용해서 EFFBD(Enhanced FFBD)를 그린다. 이렇게 세부 시나리오가 완성되고 나면 여러 개의 세부 시나리오를 통합해서 전체 거동 분석을 완성하게 되는 것이다. 이는 상향식과 하향식 분석이 혼합된 것이라 할 수 있다. 즉, 물리적 아키텍처의 관점에서 볼 때 하부 계층에 대해서 기능분석을 수행하고 작년도에 수행한 상부 계층에 대한 기능분석 결과와 통합하여 세부 기능을 갖는 통합 거동 모델을 완성한 것이다.

CBTC 시스템은 ATO(Automated Train Operation), ATS (Automated Train Supervision), ATP(Automated Train Protection)와 같이 크게 세 가지 기능으로 나뉜다. 본 과제에서는 ATO 4개, ATP 8개, ATS 39개의 시나리오를 작성하고 각각의 EFFBD를 그렸다. 이를 시뮬레이션해서 논리적으로 문제가 없음을 검증하고 각 시나리오를 통합해서 ATO, ATS, ATP 세 개의 기능이 함께 거

동하는 것을 구현했다.

#### 4.2 기능 분석의 방법-시나리오 기반 설계

본 과제에서 기능 분석을 위해 채택한 방법은 시나리오 기반 설계로서 다음과 같은 절차를 따른다. 시스템 요소의 거동을 나타내는 시나리오를 구성하고 이 시나리오를 기능모델로 구축한다. 그 다음 구축된 기능모델이 올바르게 구축되어 기능 요구사항을 잘 만족할 수 있는지를 동적 거동분석 즉, 시뮬레이션을 통하여 확인한다. 이 동적 거동분석을 통하여 시스템의 올바른 작동에 대한 확실성을 확보할 수 있으며, 시스템의 성능을 분석할 수 있다. 동적 거동분석 결과, 구축된 기능모델이 올바르게 구축되었다는 확신이 서면 각 기능을 수행할 수 있는 컴포넌트 엘리먼트를 모델 안에서 생성시킨 후 기능을 할당하는 과정이 시스템 통합 과정이 된다. 이를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 기능 요구사항 입력
- 2) 기능 요구사항을 달성할 수 있는 개념의 설정
- 3) 개념을 시나리오로 작성
- 4) 시나리오의 정적 모델화
- 5) 정적 모델의 동적 모델화
- 6) 시뮬레이션을 통한 모델의 확실성 검사 및 시스템 성능 분석
- 7) 기능 모델 확정 및 컴포넌트 시스템 개발 및 기능 할당
- 8) 인터페이스 사양개발

이 중에서 개념을 설정하는 것과 시나리오의 작성이 가장 창조적인 작업이 된다. 요구사항을 달성할 수 있는 개념을 설정하는 것과 시나리오를 쓰는 행위는 새로운 하부 시스템을 창조하는 과정이며 이 새로운 시스템이 수행하는 프로세스와 기능들을 발생 및 정렬시키는 작업이다. 이 과정은 전적으로 시스템 분야별 전문가가 주도적으로 수행해야 하는 영역이며, 시나리오에 등장하는 시스템의 전문가들이 모두 모여 개념과 시나리오의 타당성을 검토하여야 올바른 모델이 나올 수 있다. 이 시나리오가 올바르게 만들어지지 않고서는 모델을 만드는 자체는 무의미한 행위가 된다. 모델의 근본 목적은 대화의 수단이다. 관련 전문가들이 일관된 대화를 통해 시스템을 개발하는데 사용하기 위하여 모델을 사용한다. 이렇게 대화에 사용될 모델이 잘못된 시나리오에 근거해서 만들어지게 되면 이 모델로부터 생산된 사양서를 기준으로 설계에 들어갈 경우는 모델과 같은 잘못된 제품이 나오게 되는 것은 당연한 일이다. Leveson은 안전 필수적 시스템(Safety-Critical System)과 같이 소프트웨어가 주 컴포넌트인 시스템을 개발할 때 실패하는 원인이 소프트웨어 코딩 에러보다는 시스템의 경계

와 거동을 구축할 때의 에러에 기인한다고 주장했다[5].

#### 4.3 시나리오 기반 설계

경량전철 신호시스템 기능분석을 시스템의 거동에 대한 정적 동적 모델링을 통하여 수행하였다. ATP, ATS, ATO 기능분석을 수행한 후, 수행 결과를 바탕으로 세 가지 기능을 통합하여 최상위 시스템의 거동을 분석하였다. 거동 분석의 방법은 시나리오를 먼저 작성한 후 그것을 기반으로 향상된 기능흐름블록도를 작성하여 기능과 기능적 인터페이스를 정의하는 방법을 사용했다.

연계	주어	from/To	무엇을	어떻게	중사	비고
<b>Stages</b>						
시간1	ATO 차상 장치	운행계획 관리 장치로부터	연차 운행계획 정보			받는다.
시간2	ATO 차상 장치		운행계획 내이더서비스			접근한다. ATS 요청시
시간3	ATO 차상 장치		열차 출발 시간들	시간관리 기능으로		관찰한다.
시간4	ATO 차상 장치	운행계획 DB 관련 기능에게	열차 운행계획 정보			요청한다. 정보확인 완료시
시간5	ATO 차상 장치	운행계획 DB로부터	열차 운행계획 정보	운행계획 DB 관련 기능들 통해		기여한다.
시간6	ATO 차상 장치		열차 운행계획 정보	운행계획 DB 관련 기능들 통해		제공한다.
시간7	ATO 차상 장치	운행계획 DB 정보로 부터	열차 정보			제공한다.
시간8	ATO 차상 장치		열차 예정인 열차 정보	열차 정보 확인 기능들 통해		확인한다.
시간9	ATO 차상 장치	CBTC 역 장치에게	열차 할당			요청한다. 정보확인 완료시

그림 3. 운행계획 제어를 하기 위한 시나리오 템플릿

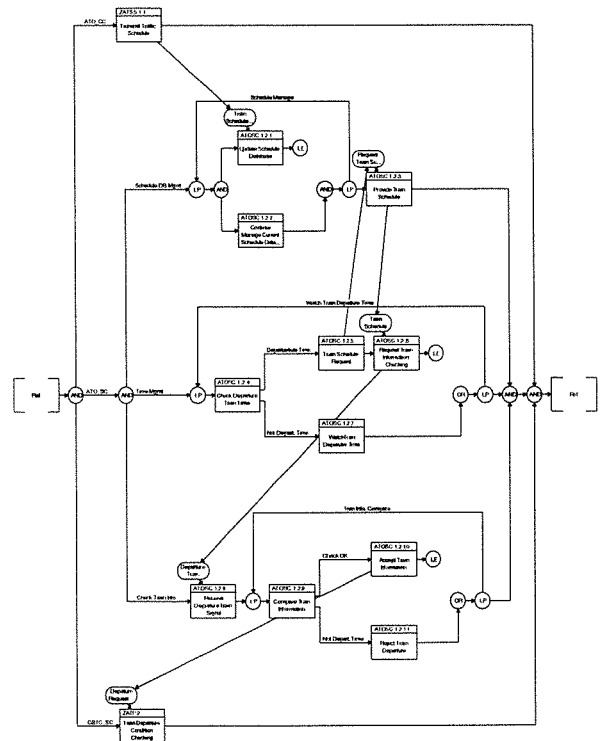


그림 4. '운행계획 제어'의 향상된 기능흐름블록도

#### 4.4 시나리오 통합에 의한 기능분석

본 연구에서는 출발지 역에서 출발조건을 확인 후 출발하여 다음 역에 정위치에 정차하는 일련의 활동을 분석하였다. 이 시나리오를 수행하기 위하여 ATP와 ATO의 하부 기능간의 상호 작용을 보여주었고 있다. 다음 그림은 열차가 한 역에서 다음 역으로 가는 동안에 일어나는 주요 동작을 시간 순서별로 나타낸 것이다.

이를 통하여 시스템 수준을 거동에 대한 분석을 완료한다.



그림 5. 시스템 통합 - 정상 상태 시나리오

#### 4.5 기능 인터페이스 정의

기능 분석을 수행하게 되면 각 기능간에 오고 가는 데이터를 식별할 수 있게 된다. 즉, 기능 수준에서 인터페이스를 정의하는 것이다. 기능 수준에서 정의된 인터페이스는 연이어 구축된 물리적 아키텍처의 물리적 인터페이스로 할당된다.

예를 들어 열차의 위치 정보가 광 케이블을 통해 전달될 때 물리적 인터페이스는 광 케이블이 되고 기능적 인터페이스는 열차의 위치 정보가 되는 식이다. 인터페이스 정의를 통해 추적성을 갖는 기능적/물리적 인터페이스를 식별하였다.

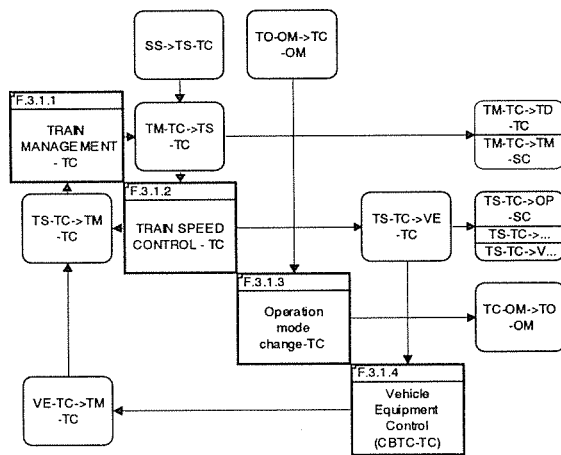


그림 6. CBTC-TC N<sup>2</sup> Diagram

#### 5. 기능 분석 결과

이와 같은 총 51개의 시나리오를 분해하고 통합하여 분석한 결과 시스템 수준에서의 시스템 거동을 파악할 수 있었고, 2수준에서 ATO에서는 두개의 기능, ATS에서 두개의 기능을 추가적으로 식별하였다. 이뿐만 아니라 이를 통하여 요구사항 모델을 정련 할 수 있었다. 그리고 기능 분석과정에서 얻어지는 산출물들이 고장분석을 수행하는데 적절히 활용했다. 그리고 기능분석을 통해서 기능간의 인터페이스를 정의하고 이를 물리적 인터페이스에 할당함으로써 복잡한 CBTC 시스템의 인터페이스를 완전하게 식별하는 성과를 거두었다.

#### 6. 결론

본 연구에서 기존 정적인 데이터모델을 시나리오 기반으로 동적거동 분석을 수행하여 기능 모델을 구축하였고 기능 모델을 토대로 한 시스템 아키텍처를 구성하였다. 특히 기능 요구사항의 취약성을 보완하기 위해 CORE의 FFBD기능을 활용하여 열차 운행 중 발생할 수 있는 여러 가지 시나리오를 분석함으로써 4개의 추가적인 기능을 식별하였다. 이는 기존에 구축된 정적인 데이터 흐름 다이어그램(DFD:Data Flow Diagram)이 가지는 한계를 모델 기반 시스템공학 도구에서 지원하는 동적인 기능 분석을 수행하여 보완함으로써 모델의 충실도를 높인 것을 보여주는 것이다. 이를 통해 기능의 오류를 개념단계에서 최소화함으로써 기술 위험이 높은 제품을 개발하는 유용한 방법으로 사용할 수 있다는 것을 확인하였다.

#### 후 기

본 논문은 건설교통부에서 지원한 경량전철 기술개발사업을 수행한 연구 결과의 일부이다.

#### 참고문헌

- [1] EIA, EIA-632 : Processes for Engineering a System, EIA, 1999.
- [2] 경량전철 종합시스템엔지니어링 연구결과보고서, 한국철도기술연구원, 아주대학교, 2000.12
- [3] Dennis M. Buede, The Engineering Design of Systems, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000.
- [4] 경량전철시스템 기술개발사업 3차년도 연구결과보고서 (분야: 신호제어시스템기술개발), 건설교통부, 한국철도기술연구원, 2001, 12.
- [5] Nancy G. Leveson, Safeware: System Safety and Computers, Addison-Wesley, Inc., Boston, 1995.
- [6] Joong Yong Park, Young Won Park et. al., "Application of Computer-Aided Systems Engineering to Develop Automated Guided Transit (AGT) System Architecture", Proc. of the 11th International Symposium of the International Council on Systems Engineering, 2001
- [7] 한국철도기술연구원, 경량전철시스템 기술개발사업 1차년도 연구결과보고서(분야 : 신호제어 시스템 기술개발), 건설교통부, 1999, 12.
- [8] 아주대학교, 경량전철 종합시스템엔지니어링 위탁과제 연구결과보고서 (과제명: 분야별 시스템 기능에 대한 상세분석), 건설교통부, 2001, 12.