

## 모델기반 시스템공학을 응용한 대형복합기술 시스템 개발

### Application of Model-Based Systems Engineering to Large-Scale Multi-Disciplinary Systems Development

박 중 용, 박 영 원

(Joong-Yong Park and Young-Won Park)

**Abstract** : Large-scale Multi-disciplinary Systems(LMS) such as transportation, aerospace, defense etc. are complex systems in which there are many subsystems, interfaces, functions and demanding performance requirements. Because many contractors participate in the development, it is necessary to apply methods of sharing common objectives and communicating design status effectively among all of the stakeholders. The processes and methods of systems engineering which includes system requirement analysis; functional analysis; architecting; system analysis; interface control; and system specification development provide a success-oriented disciplined approach to the project. This paper shows not only the methodology and the results of model-based systems engineering to Automated Guided Transit(AGT) system as one of LMS systems, but also propose the extension of the model-based tool to help manage a project by linking WBS (Work Breakdown Structure), work organization, and PBS (Product Breakdown Structure). In performing the model-based functional analysis, the focus was on the operation concept of an example rail system at the top-level and the propulsion/braking function, a key function of the modern automated rail system. The model-based behavior analysis approach that applies a discrete-event simulation method facilitates the system functional definition and the test and verification activities. The first application of computer-aided tool, RDD-100, in the railway industry demonstrates the capability to model product design knowledge and decisions concerning key issues such as the rationale for architecting the top-level system. The model-based product design knowledge will be essential in integrating the follow-on life-cycle phase activities, production through operation and support, over the life of the AGT system. Additionally, when a new generation train system is required, the reuse of the model-based database can increase the system design productivity and effectiveness significantly.

**Keywords** : systems engineering, LMS(Large-scale Multi-disciplinary System), behavior diagram, operational scenario, functional analysis

#### I. 서론

우리나라는 대도시의 교통문제를 해결하기 위하여 도로 및 철도 등 교통시설의 공급을 확대함과 동시에 버스 전용차로의 확대 등 대중교통 우선 정책을 추진해오고 있다. 대도시의 교통문제 해결을 위해서는 지하철과 같은 대량의 수송시설을 도입하여 급증하는 교통 수요를 원활히 처리할 수 있어야 하나 지하철의 건설 또한 높은 사업비가 소요되어 재원 조달에 많은 어려움이 있다.

따라서 기존 지하철에 비해 건설비 및 운영비가 저렴하고 건설이 비교적 용이하며 교통수요에 탄력적으로 대처할 수 있는 경량전철의 국내 도입 방안이 검토되고 있다[1].

한국철도기술연구원은 건설교통부의 지원 아래 1999년부터 2002년까지 4년에 걸쳐 경량전철시스템 기술개발사업을 수행하고 있다. 이 사업의 목적은 국내 환경에 적합한 경량전철의 시스템기술을 개발하는 것이다. 경량전철을 구성하는 차량, 신호, 전력공급 및 선로구축물 분야는 여러 기업의 참여로 기술개발이 진행되고 있으며, 종합시스템 엔지니어링 분야에서 각 분야의 개발기술을 통합 및 평가

하고 있다. 개발의 초기 단계인 개념설계에 주력하는 시스템공학 기술의 확보는 설계 및 양산 과정에서 발생하는 오류를 상당 수 줄일 수 있으며 이로 인해 시스템 구축 비용을 최소화시켜 국내 경량전철 건설의 활성화에 일조할 것이다[2].

경량전철시스템과 같은 대형 복합기술 시스템은 구성하고 있는 컴포넌트 및 인터페이스, 시스템의 기능, 그리고 자동화 운영 등의 시스템 요구사항들이 방대하고 복잡하다. 또한 많은 하위 계약자들이 참여하고 있기 때문에 시스템 전체의 개발 목표를 달성하기 위해서는 모든 이해당사자들이 공통된 목표를 공통된 의사소통 방법으로 공유해야 하며 상호 유기적인 관계를 유지하는 방법의 적용이 필수적이다.

본 논문은 대형 복합기술 시스템의 한 예인 경량전철 시스템의 요구사항 관리, 기능 분석, 상부 시스템 설계와 같은 종합적 시스템 엔지니어링 업무를 모델기반의 전산도구(RDD-100)를 사용하여 수행한 방법론과 결과를 보여준다. 제한된 자원으로 수행되어야 하는 시스템 기본설계 과정에서 업무의 생산성과 설계 지식의 정보화 및 추적성을 확보하고 이를 제품의 전 수명에 걸쳐 공유하며, 의사소통과 의사결정을 지원하는 일은 경전철 사업과 같은 대형 사업의 성공적인 수행에 필수적이다. 아울러 본 논문은 업무체계, 조직체계, 그리고 물리적 시스템을 통합하여 정보화하고 관리하는 모델을 제시한다.

접수일자 : 2000. 9. 9., 수정완료 : 2001. 5. 3.

박중용 : 고등기술연구원 생산기술센터(jypark@iae.re.kr)

박영원 : 아주대학교 시스템공학과(ywpark@iae.re.kr)

※ 본 논문은 "경량전철시스템 기술개발사업" 연구 결과의 일부분으로 건설교통부의 지원으로 수행되었습니다.

**II. 시스템공학의 필요성과 우리나라의 실정**

오늘날의 시스템은 기계, 전기, 전자, 컴퓨터, 소프트웨어, 화학, 건축 등 다분야의 지식이 밀집되어 만들어진다. 그에 따라 관련된 정보도 엄청나게 늘어나고 있으며, 이 모든 것을 다 알고 시스템을 개발할 수 있는 엔지니어는 이제 존재하지 않게 되었고 각 전문분야에만 능통한 엔지니어들이 등장하기 시작했다. 그러나, 전문가만을 중요시하는 풍토는 증대한 문제점을 발생시켰다. 즉, 각 전문분야간에 벽이 생기게 되어 여러 분야가 상승적 관계로 융합되어야만 개발될 수 있는 오늘날의 복잡한 시스템을 성공적으로 개발하는데 차질이 생기게 된 것이다.

시스템공학은 이러한 벽을 허물고 각 집단 간의 의사소통(Communication)을 원활히 하여 시스템 전체 수준에서 최적화를 이루는데 그 목적이 있다. 개발하고자 하는 시스템이 성공적으로 개발되었는가 아닌가 하는 문제는 시스템의 요구사항이 얼마나 효과적/효율적으로 시스템을 통해 구현되는지에 달려 있다. 시스템공학은 고객의 요구사항이 비용, 일정 그리고 성능을 만족시키는 시스템으로 전환될 수 있도록 적절한 체계를 제시한다.

선진국에서는 이미 군수산업, 항공우주산업, 사회간접자본산업, 자동차산업, 통신산업, 소프트웨어 산업 등 첨단 고부가가치 대형·복합산업 분야에 시스템공학 기술이 없어서는 안될 필수적인 기술로 인정받고 있다.

예를 들면, 미국의 방위산업체 및 NASA는 성능, 비용, 일정을 모두 고려한 최적의 시스템을 개발하기 위해서 각종 프로젝트 수행시 시스템공학 기술을 사용하고 있는 대표적인 기관이다. 시스템공학 전산지원도구로 주로 활용되는 것을 분야별로 살펴보면 요구사항분석 및 관리 도구로 Ascent Logic 사의 RDD-100, 비용 분석 도구로 Price Systems 사의 PRICE, 또 각종 성능해석 도구 등이 있는데 이들을 서로 연동하여 획기적인 개발 비용 감소와 공기 단축 등의 성과를 거두고 있다. 또한 선진국 자동차회사인 GM, FORD, Chrysler, VOLVO 등은 QFD(Quality Function Deployment), RDD-100, Statemate, Life-Cycle Management 등과 같은 시스템공학 방법론과 전산지원도구들을 적용하여 탁월한 경쟁력을 확보하였고 신차 개발에 좋은 성과를 거두었다[3].

이에 반해 시스템공학에 대한 국내의 인지도는 매우 미약한 상황이며 시스템공학 연구에 대한 투자와 그 성과는 아직 미미한 실정이다. 그 이유는 국내의 산업 현장은 지금까지 새로운 시스템을 개발하기보다는 외국의 선진 제조 기술을 그대로 도입하여 제조하는 데만 치중함으로써 제품을 개발하는 초기 과정인 개념설계에 대한 기술 확보의 필요성을 인식하지 못하고 있기 때문이다. 이러한 시스템공학에 대한 낮은 인지도는 글로벌 경제 체제에서 생존하는데 커다란 위협이 되고 있다. 최근의 여러 대형 국책 사업들의 경우도 이러한 기술이 부족하여 수많은 설계 변경, 공기 지연, 비용 상승 등의 문제점들이 발생한 것으로 볼 수 있다.

시스템공학은 새로운 시스템을 개발하기 위한 유용한 프로세스와 방법을 제공해 주기 때문에 최근의 시장 요구에 가장 적절하게 부합할 수 있는 제품 개발의 know-how가 될

수 있다. 시스템을 자체적으로 개발하고자 할 때 우리나라 업체들에게 가장 부족한 기술이 개념설계 기술이다. 즉, 요구사항을 정확히 분석하고 운영 시나리오를 작성하여 필요한 기능을 정의한 후 물리적인 시스템 아키텍처를 구축하는 절차와 방법론에 대한 경험이 거의 없는 실정이다.

다행히, 최근에 이르러 국방 분야와 국책연구소 등에서 시스템을 우리 기술로 개발하는 것에 관심을 보이면서 시스템공학에 대한 연구와 적용이 이루어지고 있다. 시스템공학을 적용하는 대표적인 개발 사업으로는 경량전철 사업 이외에도 차세대 고속전철 개발 사업과 몇몇 방위 산업이 있다.

**III. 시스템공학의 개념**

INCOSE(International Council on Systems Engineering)의 초대회장이 Jerry Lake는 시스템공학을 “복잡한 문제를 해결하기 위해 이 문제에 관련된 모든 당사자의 요구사항을 만족시키기 위한 학제간(inter-disciplinary)의 종합적 접근법이다.”라고 했다[4].

시스템 설계의 목적을 달성하기 위한 절차를 여러 사람들이 제시했는데 Martin이 정리한 시스템 설계의 핵심되는 절차를 보면 그림 1과 같다[5].

그림 1의 절차는 문제를 정의하고 해결책을 도모하는 반복 과정을 나타내는 것으로 요구사항 분석과 기능분석/할당과 같은 문제 정의 단계와 해결책을 제시하는 아키텍처 설계 단계, 그리고 성능, 리스크나 비용을 고려하여 최적의 해를 도출할 수 있도록 도와주는 시스템 분석/통제 단계로 나뉘어져 있다.

주요 네 단계를 수행하는데 있어서 유의할 사항은 각 단계가 철저히 반복적으로 수행되어야 한다는 점이다. 요구루프, 설계루프, 검증루프 등이 이러한 반복적인 과정을 설명하고 있다. 즉, 네 단계가 상호보완적으로 작용하여 최초의 요구사항으로부터 하부시스템의 설계에 이용될 수 있는 사양서를 최종 산출물로 발생하게 된다.

**IV. 모델기반 시스템공학 전산지원 도구**

**1. 시스템공학 전산지원 도구의 필요성**

시스템공학 프로세스를 적용하는데 있어서 전산지원 도구의 사용은 시스템 설계 자동화(System Design Automation)에 필수적이다. 객체지향 데이터베이스를 통한 모델기반의 전산지원 도구가 개발되지 않았던 과거에는 시스템공학의 필요성에도 불구하고 방대한 문서 작업과 데이터 때문에 시스템공학을 수행하기가 쉽지 않았던 것이 사실이다. 그

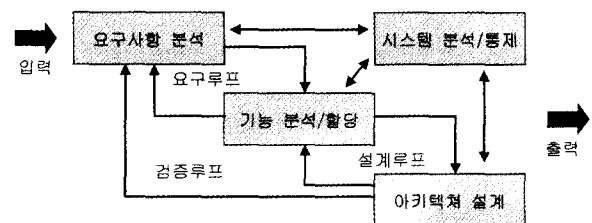


그림 1. 시스템 설계 프로세스.  
Fig. 1. Systems design process.

러나, 지금과 같이 문자로 된 요구사항들을 모델링하고 각종 도표들을 쉽게 그려주는 등 시스템공학 프로세스를 적절히 적용할 수 있는 도구가 개발되어 있는 상태에서 도구의 이용은 설계공학에서 CAD/CAM의 이용만큼 당연하다고 할 수 있다.

모델기반 전산지원 도구의 혜택을 간단히 소개하면 다음과 같다[4].

1) 방대한 정보 저장과 관리

복잡한 시스템 개발 과정에는 이와 관련된 정보의 양이 방대하기 때문에 수 작업으로 많은 양의 정보를 처리할 수가 없다.

2) 프로토타이핑(Prototyping) 최소화

시스템 수준에서 다양한 관점의 모델링 및 시뮬레이션을 통해 타당성 있는 시스템 대안을 제시하고 시뮬레이션 분석하여 실물 프로토타입의 제작을 최소화하면서 시스템 개발의 올바른 방향성을 설정하는데 기여한다.

3) 추적성 확보

고객 요구사항과 설계 결정 사항, 그리고 시험 검증 사항들간의 추적성을 확보한다. 즉, 어떤 요구사항을 만족시키기 위해 결정한 설계 사항, 그리고 시험 검증 사항들을 서로 연결시켜서 설계 사항이 바뀌어야 할 때 원래의 요구사항에 위배되지 않는지 신속하게 파악할 수 있게 한다.

4) 자동화에 의한 업무 생산성 향상

시스템 개발에 필요한 많은 정보를 관리하거나 문서를 작성하는 일에 시스템 설계자의 노력이 허비되어 정말로 중요한 창의적인 사고를 할 여유가 없는 경우가 많다. 하지만 좋은 도구를 선택하게 되면 업무 생산성을 크게 향상시키며, 수 작업에 의한 오류 방지와 자료 공유가 가능하다.

5) 시스템공학 절차 라이브러리 구축

다양한 시스템에 대한 시스템공학 절차 라이브러리를 구축하여 필요시 프로젝트에 적절한 테일러링(tailoring)을 통해 쉽게 재활용할 수 있도록 한다. 따라서 시스템 개발의 기간을 단축하고 문제발생의 가능성을 줄이며 긴급한 제안서 등의 작성을 지원한다.

2. RDD-100

경량전철 사업을 수행함에 있어서 여러 시스템공학 전산지원도구 중 미국의 Ascent Logic사에서 개발한 RDD-100을 선택하였다. 철도개발사업에 초기부터 응용되기는 차세대 고속전철 사업과 함께 본 사업이 처음이다.

RDD-100은 그림 1에서 제시한 시스템공학 프로세스를 충실히 따라갈 수 있도록 틀을 제공하는데, RDD-100을 이용하여 시스템공학을 적용하는 절차는 그림 2와 같다.

고객으로부터 요구사항을 끌어내어 가능한 수준까지 세분화하는 작업을 통해서 시스템 요구사항을 작성하는 요구사항 분석 및 관리 업무를 먼저 수행한다. 요구사항 분석이 끝나고 나면 개발하고자 하는 시스템의 거동 분석을 통해서 기능을 정의하게 된다.

이때, 모델링된 거동의 동적인 분석을 위해 DVF(Dynamic Verification Facility)를 이용하여 시뮬레이션을 실시한다. 이 과정을 통해서 거동 분석의 적합성을 판단할 수 있게 되고, 필요한 요구사항을 더 끌어낼 수도 있다. 추출

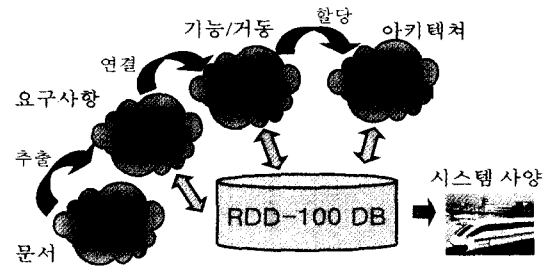


그림 2. RDD-100을 이용한 시스템공학.  
Fig. 2. Systems engineering by RDD-100.

된 요구사항 중 기능적 요구사항을 거동분석의 각 기능에 할당하여 기능적 요구사항의 완전성 여부를 분석한다. 요구사항 분석과 기능 분석이 어느 정도 마무리되면 시스템의 상부구조를 설계한 다음 거동모델의 기능을 컴포넌트에 할당하여 기능 수행의 구체적인 대상을 결정한다. 시스템 요구사항 중 비기능적 요구사항은 기능에 연결될 수 없기 때문에 해당되는 컴포넌트에 직접 할당되어 시스템의 사양을 도출한다. 크게 세 단계로 나누어진 과정을 통해 생성되는 데이터는 하나의 데이터베이스에 저장되고 관리되며 이 데이터를 가지고 요구사항 분석, 기능 분석, 아키텍처 작업이 서로 되먹임되면서 반복된다. 필요할 때 데이터베이스의 자료로부터 원하는 형태의 문서를 자동으로 작성할 수 있다.

V. 경량전철 시스템 응용 사례

경량전철 시스템공학 과제는 경량전철 시스템을 개발하기 위한 각종 요구사항들과 제약사항들을 모델기반 전산지원 시스템공학 도구를 사용하여 체계화하고 데이터베이스화하여 개발 사업의 기술적 추적체계를 정립하고 원활한 기술개발 관리 및 일관된 기술개발 목표를 지향하도록 지원하는 것을 목표로 하였다. 과제 모델은 다음 그림 3과 같다.

모델을 보면, 요구사항이 그것을 만족하기 위한 각 기능으로 연결되고 기능이 다시 기능을 구현하기 위한 컴포넌트에 할당됨을 알 수 있다. 또한, 검증을 하는 작업이 추가되어 요구사항이 적절한 지도 점검할 수 있게 하였다. PBS가 결정되면 각 컴포넌트를 제작하기 위한 업무를 WBS에서 정의하여 PBS와 연결하고 업무를 수행하는 조직과 공정과도 연결시켜 RDD-100의 데이터 파일만 있으면 하나의 컴포넌트가 설계되기까지의 요구사항에서부터 변경된 사항, 그리고 그것을 제작하기 위한 업무, 조직, 공정 등이 추적성을 가지고 관리된다[6].

즉 시스템 개발의 설계지식, 즉 설계 요구사항과 사양, 설계시험 업무, 그리고 개발사업의 공정 관리를 위한 모든 기술 정보가 상호추적 관리되도록 모델링되는 것이다. 이는 최근 관심이 집중되고 있는 지식경영을 실천하는 한 방법으로 제시될 수 있다.

본 연구에서는 개발 조직과 공정을 제외한 요구사항, 거동(기능), 아키텍처, 검증, WBS를 정의하고 이를 객체지향모델 데이터베이스화한 것이다. 이를 정리하면 다음과 같다.

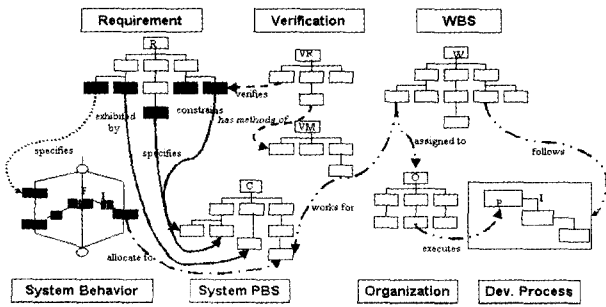


그림 3. 일반적인 시스템공학 모델.  
Fig. 3. General systems engineering model.

- 경량전철 시스템 요구사항 분석, 모델링 및 관리체계 설정
- 시스템 수준의 기능 분석 및 모델링
- 아키텍처 구성
- 개발작업과의 연계 관리

1. 요구사항 분석과 모델링

일반적으로 요구사항은 다음 그림과 같은 구조를 갖고 작성된다[7].

즉, 개발하고자 하는 시스템의 임무 요구사항이 정의되고 나면, 고객은 자신이 원하는 요구사항을 기술하게 되는데 이것이 최초 요구사항(originating requirement)이다. 시스템 엔지니어는 최초 요구사항을 엔지니어링 용어로 전환하는 작업을 하게 되며 이때 시스템 요구사항이 만들어진다.

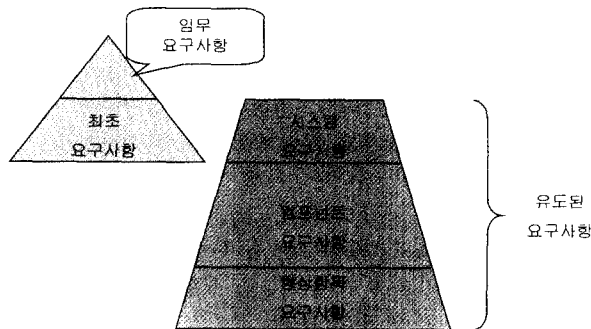


그림 4. 요구사항의 체계.  
Fig. 4. Requirements hierarchies.

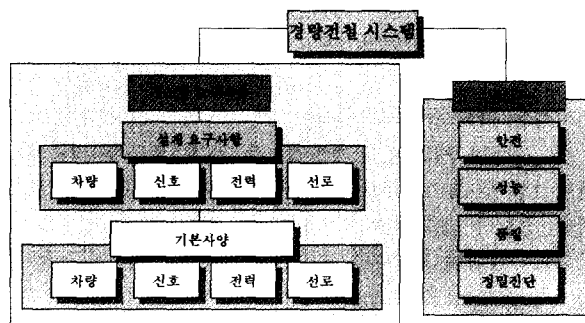


그림 5. 경량전철의 최초 요구사항 구조.  
Fig. 5. AGT originating requirements structure.

최초 요구사항과 시스템 요구사항이 담고있는 내용은 같은 것이나 엔지니어링 접근 방법이나 정량화 정도에 따라 차별성을 갖는다. 시스템 요구사항으로부터 하부 시스템, 컴포넌트에 대한 요구사항을 유도해내고 결국에는 형상항목에 대한 요구사항이 만들어진다.

경량전철 시스템을 개발하기 위해서 그림 5와 같이 최초 요구사항과 기준을 정의하였다.

경량전철 시스템을 개발하기 위해 마련된 요구사항은 크게 세 가지 부류로 나뉘어진다.

1) 시스템 요구사항

운전환경, 안전 요구조건, 시스템 확실성, 시청각 통신장치에 대한 요구사항으로 구성되어 있다.

2) 설계요구사항

시스템 요구사항의 하부 요구사항으로서 차량, 신호, 전력, 선로와 같은 경량전철 시스템의 하부 시스템을 설계하는데 필요한 요구사항을 정리하였다.

3) 기본 사양

차량, 신호, 전력, 선로와 같은 경량전철 시스템의 하부 시스템을 설계하는데 지침이 되는 기본 사양을 PBS의 각 하부 시스템 컴포넌트 별로 작성하였다.

위의 요구사항 외에 경량전철 시스템을 개발할 때, 반드시 지켜야 할 네 가지 도시철도 표준화 기준이 있다. 이러한 기준들은 시스템 요구사항, 설계요구사항, 기본 사양, 그리고 시험검증 요구사항들 중 이미 표준화된 부분들로서 모든 경량전철 시스템은 네 가지 기준을 만족시켜야 한다.

1) 안전기준 : 도시철도차량의 구조 및 장치의 안전운행에 필요한 기준을 규정하는 것으로 총 85조로 구성되어 있다.

2) 성능평가 기준 : 도시철도차량의 성능시험에 필요한 세부기준 및 방법 등과 성능시험자의 지정에 관한 세부적인 사항 등을 규정한다.

3) 품질인증 기준 : 도시철도에 사용되는 부품·기기 또는 장치의 성능 및 안전성 확보를 위하여 실시되는 도시철도용품의 품질인증제도 시행에 필요한 대상, 기준 및 절차를 정한다.

4) 정밀진단지침 기준 : 도시철도차량의 정밀진단실시에 필요한 사항을 규정한다.

하지만 위의 세 가지 요구사항과 네 가지 기준은 시스템공학 관점을 부여하기 전에 작성된 것으로 위에서 제시한 시스템공학적 관점에서 요구사항을 다시 분석한 결과, 이미 작성된 요구사항의 체계가 적절하지 않음을 발견하였다. 즉, 설계요구사항과 기본 사양이 중복되어 구분되지 않는 항목을 상당 수 포함하고 있었으며, 시스템 요구사항도 최초의 임무 요구사항으로부터 제대로 유도되지 않았다.

이러한 문제점을 해결하기 위해서 요구사항을 크게 임무 요구사항과 시스템 요구사항으로 구분하고 시스템 요구사항을 다음과 같이 6개의 부류로 나누었다.

1) 환경 요구사항 : 운영 환경에 대한 요구사항

2) 기능 요구사항 : 시스템이 갖추어야 할 기능에 대한 요구사항

3) 안전 요구사항 : 무인 운전에 대비한 안전에 관한 요구사항

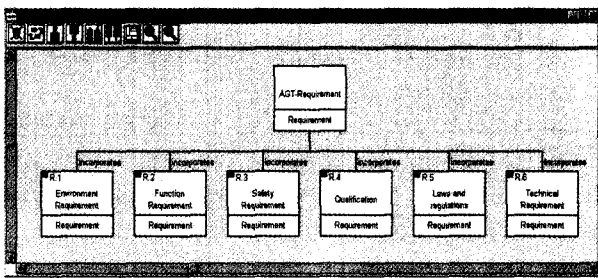


그림 6. 경량전철의 시스템 요구사항.  
Fig. 6. System requirements of AGT.

- 4) 검증 요구사항 : 개발한 시스템을 검증하기 위한 요구사항
- 5) 법규 요구사항 : 요구사항을 제한하는 법규에 대한 요구사항
- 6) 기술 요구사항 : 사용되어야 하는 기술에 대한 요구사항

이러한 분류에 따라 요구사항을 RDD-100을 사용하여 객체지향 데이터베이스화 하고 분해 가능한 수준까지 분해하게 된다. 요구사항을 적절히 분해하지 않게 되면 하나의 요구사항이 여러 개의 기능이나 컴포넌트에 할당되어 최적의 설계가 이루어지기 어렵다.

2. 기능 분석

개발하고자 하는 경량전철 시스템이 수행해야 할 기능이 무엇인지 정의하는 단계이다. 이 단계에서 중요한 것은 무엇을 해야 하는가를 정의하는 것이지 그 기능을 어떻게 수행해야 하는가를 고려하지는 않는다는 것이다.

RDD-100은 시스템이나 개별 컴포넌트의 거동을 표현할 수 있는 기능을 가지고 있다. 즉, 거동 다이어그램을 통해서 시스템의 제어명령, 기능, 데이터의 흐름과 인터페이스를 파악하고 DVF(Dynamic Verification Facility)를 이용하여 시뮬레이션을 해봄으로써 요구사항에서 기대했던 시스템의 거동 시나리오가 타당한지의 여부 등 제반 개발 문제를 구체화하기 위해 수행된다. 이 과정을 통해 드러난 모순점이나 미비한 점은 다시 요구사항 분석 단계로 되먹임 되어 요구사항에 반영된다.

경량전철 시스템의 거동분석은 먼저 시스템 수준의 운영 시나리오를 작성하고 이를 분석하는데서 시작하여 무인 경량전철의 핵심 기능인 추진/제동 기능에 대해서 하부 수준까지 분석한다.

본 논문에서는 운영 개념을 설정하여 시나리오를 작성하는 과정과 결과에 대해서 언급하겠다. 운영 개념(Operational Concept)은 시스템이 어떤 일을 할 것인지 정의하는 것으로 여러 개의 시나리오가 묶여서 만들어진다. 이때, 시나리오는 외부의 다른 시스템으로부터 들어오는 입력에 대해서 원하는 출력을 얻기 위해 어떻게 반응하는지를 정의한다[7]. 따라서, 임무 요구사항과 같이 상위 요구사항으로부터 운영 개념을 도출할 수 있으며, 올바른 운영 개념을 작성하기 위해서는 개발자는 물론이고 이용자와 함께 팀을 이루어 작업을 진행해야 한다.

운영 개념은 시스템 개발 초기에 이용자와 의사 소통을

함으로써 시스템에 대한 이해를 높이고 문서로 작성된 요구사항과의 추적성을 확보하며 요구사항을 검증하는 역할을 하기도 한다[8].

특히, 경량전철 시스템과 같은 복합 시스템의 경우, 운영 개념의 설정은 필수적이라 할 수 있는데 우리나라에서는 이런 작업의 필요성과 중요성을 아직 제대로 인식하고 있지 않기 때문에 실제 작업을 수행하는데는 어려움이 많다.

경량전철 시스템 기능분석은 시스템의 거동에 대한 정적·동적 모델링을 통하여 수행하였다. 본 과제의 거동분석은 총 4개로 차량 기지에서 자체 점검, 정상 무인운전에 대한 것, 응급시 사람이 투입되어 운전하는 경우, 그리고 마지막으로 구원 운전의 경우에 대해서 시스템 레벨에서 분류되어 작성되어 있으며, 차후 발생할 수 있는 수많은 시나리오에 대한 접근이 있어야 할 것이다.

경량전철 시스템의 거동 다이어그램은 동시에 수행되는 프로세스와 어떤 일을 수행하고 입력에 의해 출력을 내는 기능과 다른 프로세스의 기능들 사이에서 오가는 메시지 아이템들로 구성되었다. 각 기능과 메시지 아이템은 계층적으로 분해될 수 있으므로 시스템의 기능을 상위 수준으로부터 하위수준으로 내려가면서 관찰할 수 있다. 각각의 시나리오에는 경량전철이 출발하고 정지하는 기능들이 계속해서 반복되는데 이것이 곧 추진제동기능이다.

네 가지 시나리오 중에서 자체 점검 시나리오에 대해 수행한 정적/동적 기능분석 과정과 결과를 소개한다. 자체 점검 시나리오는 차량기지에서 운영을 위한 차량시스템과 전력시스템의 사전 자체점검을 수행하는 시나리오로서 다음과 같다.

- 1) 종합사령실에서 기동신호를 전송하여 전력시스템을 기동한다.
- 2) 전력시스템이 기동기능을 수행한다.
- 3) 전력시스템에서 기동완료신호를 종합사령실로 전송한다.
- 4) 전력시스템에 이상 발생시에는 이 신호를 전력시스템에서 종합사령실로 전송한다.
- 5) 종합사령실에서 열차번호를 설정하고 이 신호를 열차로 송부한다.
- 6) 종합사령실에서 해당열차의 key-up신호를 차량에 있는 종합제어장치로 전송하여 열차의 기동기능을 수행한다.
- 7) 열차에서 차량에 있는 종합제어장치에서 종합사령실로 기동완료신호를 전송한다.
- 8) 열차에 이상 발생시에는 차량에 있는 종합제어장치에서 이상신호를 종합사령실로 전송한다.
- 9) 종합사령실에서 차량에 있는 종합제어장치로 무인운전 모드신호를 전송하여 운전모드를 무인운전모드로 설정한다.
- 10) 종합사령실에서 차량에 있는 자동열차제어장치(ATO)로 출발신호 및 속도지령을 전송하여 열차를 차량기지에서 출발역으로 이동시킨다.
- 11) 선형열차를 출발역(1번역)에 대기시키고 종합사령실에 있는 자동열차관리장치(ATS)에서 자동열차관리기능에 의해 열차운행조건을 만족하는지를 확인한다.

그림 7은 RDD-100의 거동 다이어그램 기능을 이용하여

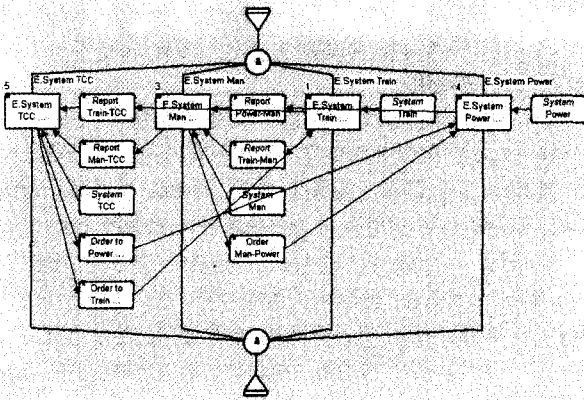


그림 7. 자체 점검 거동 다이어그램.  
Fig. 7. Self test behavior diagram.

자체 점검 운영 시나리오를 작성한 것이다. 지상설비 TCC (Total Control Center)와 차량 시스템, 전력 시스템 간에 메시지를 주고받으며 기능을 수행하는 모습을 최상위 수준에서 나타낸 것이다. 각 기능의 왼쪽 상단의 조그만 검정네모는 기능 내에 또다시 구체적인 하부 기능을 포함하고 있음을 나타낸다. 이와 같이 시스템거동을 계층적으로 표현하여 시스템의 거동을 알기 쉽게 하므로 이해당사자들과 의사소통을 원활히 수행할 수 있다.

거동 다이어그램을 통해 시스템이 갖추어야 할 기능을 표현한 후에는 거동이 제대로 돌아가는지를 검증하기 위해서 RDD-100의 DVF 기능을 이용하여 시뮬레이션 해본다. 시뮬레이션을 통해서 기능, 제어, 자원, 또는 데이터의 흐름이 원활한지, 시나리오가 제대로 작성되었는지의 여부 등 물리적 시스템의 골격을 구축하기 전에 기능적 수준에서 개발 문제의 정의를 검증할 수 있다. RDD-100의 DVF는 두 가지의 기본적인 기능을 가지고 있다. 그중 하나는 정적인 모델에서는 나타나지 않았던 문제나 에러를 밝혀낼 수 있는 것이고, 또 한가지는 Timeline이나 메시지 흐름을 통하여 시스템 성능을 최적화하는데 도움을 주는 것이다.

그림 8은 DVF를 사용한 동적 시뮬레이션의 화면을 나타낸 것이다. 오른쪽 상단의 화면은 DVF 제어화면이며 왼쪽

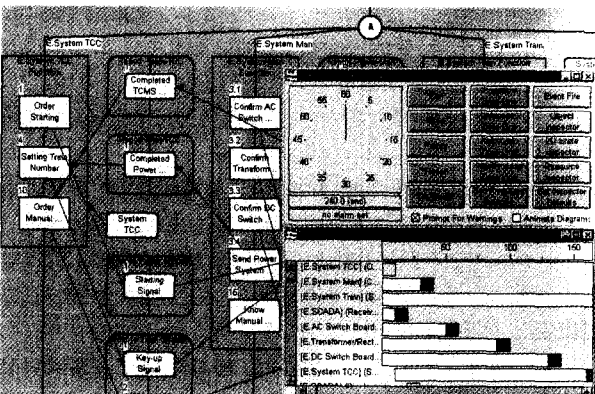


그림 8. 자체 점검 시나리오 DVF 실행.  
Fig. 8. Execution of self test scenario DVF.

쪽의 그림은 거동모델이다. 오른쪽 아래의 화면은 시뮬레이션을 하는 과정에서 시스템의 기능이 순차적으로 어떻게 수행되는지 그래프로 보여주고 있다.

상기과정은 지상에는 종합사령실, ATP, ATS가 차량에는 TCMS(Total Control Monitoring System), ATO가 탑재되어 BCU(Brake Control Unit)와 PCU(Propulsion Control Unit)를 제어하는 간단한 시나리오에서 시작하였으나, 많은 검토와 수정을 통하여 주요 핵심쟁점사항을 발견, 효율적인 시나리오 작성이 되도록 하였다.

다음은 기능분석을 통해 논의되었던 핵심쟁점사항과 해결 방안이다.

1) 기지를 포함한 초기 운전부터 마지막 기지 복귀까지 전체를 무인운전으로 시나리오 작성

- 문제점 : 시나리오 작성시 기지내 작업자 보호에 대한 사항이 요구사항에 빠져 있음.

- 해결책 : 기지내에서 무인 자동으로 작동할 시 위험요소 배제가 어렵고, 이러한 해외사례가 없음으로 인해 기지에서 첫째 역, 마지막 역에서 기지로 가는 경우는 수동운전으로 전환함.

2) 역과 역 사이 운전시 항시 자가진단(변전소상태 및 기차전체시스템 자가진단)을 하게 되어있음.

- 문제점 : 표정속도에 영향을 줌.

- 해결책 : 자가진단을 기지에서만 실시하는 것으로 규정. 단, 전철과 전철 사이의 안전 및 대인 안전에 관한 사항만 점검하도록 한다.

3) MC(Master Controller) 와 TCMS의 기능이 혼재되어 있음.

- 문제점 : 자동의 경우 TCMS가 열차운행에 대한 신호 전달, 수동의 경우 MC가 열차운행에 대한 신호전달로 같은 기능을 이분화함.

- 해결책 : MC는 모드 전환(역행,타행,제동)을 하는 도구이고 전체 열차운전은 TCMS가 전담함. 즉, 자동일 때는 ATO ⇒ TCMS ⇒ 추진제동시스템, 수동일 때는 MC ⇒ TCMS ⇒ 추진제동시스템.

위에서 소개한 세가지 핵심쟁점사항의 예에서 볼 수 있듯이 거동 다이어그램을 이용한 기능분석은 경량전철 시스템의 개념을 파악하는데 상당한 도움을 준다. 향후 지속적으로 여러 가지 시나리오를 작성하여 기능분석을 수행한다면 개발 리스크를 더욱 줄일 수 있을 것이다.

3. 아키텍처 구성 및 요구사항, 기능과의 연결

제시된 요구사항은 요구사항 분석 단계와 기능 분석 단계를 거쳐서 수정되고 보완되어 요구사항을 만족시킬 수 있는 시스템의 아키텍처를 구성하는데 이용된다. 경량전철 시스템의 아키텍처를 PBS(Product breakdown Structure)로 표현하면 그림 9와 같다.

그림 9에서 종합시스템에 속하는 SEMP(Systems Engineering Management Plan), SEMS(Systems Engineering Master Schedule), TEMP(Test and Evaluation Master Plan)는 시스템 공학의 산출물로서 경량전철의 물리적 아키텍처에는 속하지 않지만 산출물에는 해당되므로 PBS에는 포함됨에 유의한다.

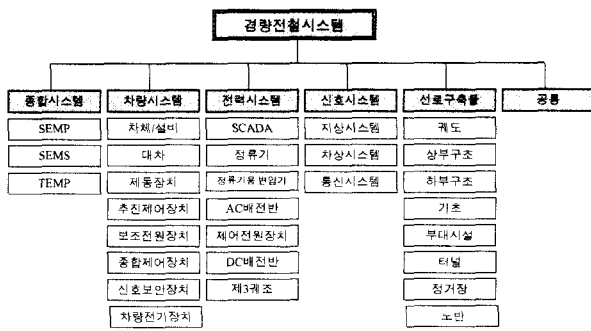


그림 9. 경량전철의 제품분해구조.  
Fig. 9. Product Breakdown Structure of AGT.

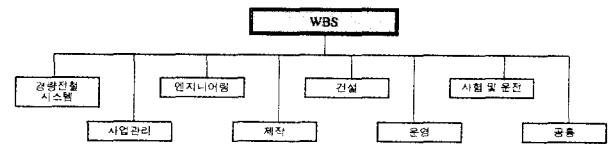


그림 11. 경량전철의 업무분해구조(WBS).  
Fig. 11. Work Breakdown Structure of AGT.

각 컴포넌트를 제작하기 위한 업무가 정의되고 이 업무를 수행할 조직과 업무가 연결될 때, 기술적인 시스템공학 과정과 관리적인 시스템공학 과정이 하나의 데이터베이스를 기본으로 결합되어 성공적인 시스템 개발 가능성을 높여 주게 되는 것이다.

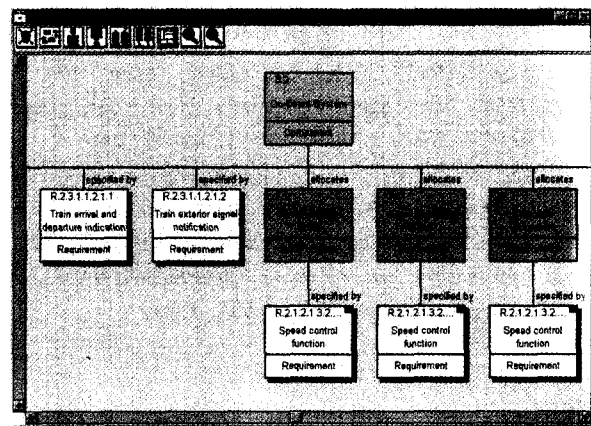


그림 10. 요구사항, 기능, 물리적 컴포넌트의 관계.  
Fig. 10. Relationship of requirements, functions, and physical components.

아키텍처에 대한 데이터 역시 RDD-100의 한 파일에 저장되어 있기 때문에 요구사항과 기능 그리고 각 컴포넌트 간의 관계를 설정하여 추적성을 확보할 수 있다.

그림 10은 차량 신호시스템에 기능과 요구사항이 할당되어 있으며 기능에 기능 요구사항이 할당된 예를 보여준다. 이렇게 연결된 요구사항, 기능, 컴포넌트를 쉽게 파악할 수 있게 함으로써 추적성 확보가 수월하게 된다.

4. 작업과의 연계 관리

업무분해구조(WBS)를 제품을 기본으로 작성한다. WBS는 하나의 프로젝트를 완성하는데 필요한 업무를 계층 구조적으로 표현한 것이다. WBS를 작성할 때, 주의할 점은 PBS를 기본으로 하여 작성해야 한다는 것이다. 제품을 언급하지 않고 기능 위주로만 WBS를 작성하게 되면, 제품에 대한 책임 소재가 분명해지지 않기 때문이다[9]. 또한, PBS를 기본으로 작성해야 하기 때문에 PBS가 확정되지 않은 개발 초기에는 상위 수준에 대한 WBS만이 작성될 것이고 PBS가 상세화되어 감에 따라 WBS도 더욱 상세하게 작성될 것이다.

그림 11은 그러한 원리에 입각하여 작성한 최상위 수준의 WBS이다. 경량전철 시스템이라는 제품을 표시하고 그 시스템을 개발하기 위한 기능에 해당하는 업무들이 함께 제시되어 있다.

VI. 결론

우리나라에서는 소프트웨어 공학을 통해 극히 일부의 방법들이 알려졌을 뿐 아직 개념이 널리 알려져 있지 않은 시스템공학과 이를 모델기반의 전산지원도구를 통해 수행하는 방법을 소개하였으며, 아울러 선진국에서 응용한 적이 없는 시스템공학 관리의 정보화에 대해서 경량 전철 개발 사례와 함께 소개하였다. 철도개발사업에 시스템 설계 자동화를 초기에 도입한 것은 이번 연구가 첫 번째 시도이다.

복잡하면서도 커다란 규모의 시스템을 개발하는데 있어서 정형화된 방법론을 적용하지 않는다면 그 개발 프로젝트는 좋은 성과를 거두기가 힘들 것이다. 지금까지 우리나라에서 수행된 대규모 프로젝트들은 수행 방법론과 개념설계를 외국에서 그대로 들여와 수행했기 때문에 적절한 수준의 산출물을 얻는데는 큰 어려움이 없었지만 우리 힘으로 시스템을 개발하려고 할 때 시스템공학과 같은 기술의 적용 없이는 실패 가능성이 커진다.

본 논문은 경량전철 시스템의 요구사항 분석에서부터 운영 개념 및 추진/제동 기능 분석 그리고 아키텍처 구축과 같은 기술적인 면과 WBS 작성과 같은 관리적인 면을 하나의 시스템공학 전산지원 도구인 RDD-100을 이용해서 수행하는 방법과 성과를 소개하였다.

본 연구를 통해서 경량전철 시스템 상부 시스템 설계 등 시스템 개발에 중요한 의사결정과 결과물들이 쉽게 모델링되고, 전산 자료화되어 성공적인 기술개발은 물론 총순기에 걸친 제품 지식 경영이 가능하게 될 것으로 전망된다. 지식 경영을 완성하는데 있어서 생산이나 상세 설계 단계와는 달리 개념 설계 단계의 지식을 체계적으로 관리하는 부분이 아직은 사각지대로 남아 있는 상황에서 본 논문에서 제시하고 있는 시스템공학 전산지원도구를 사용하여 지식을 창출하고 관리하는 방법은 좋은 대안이 될 수 있을 것이다.

즉, 개발 초기과정의 정형화, 시스템 요구사항 및 형상 관리, 시스템 인터페이스 해석과 관리, 시스템 거동해석 등에 공통적으로 응용 및 적용되어 신뢰성 있는 상부 시스템 설계가 보장될 것으로 기대된다. 또한 향후 시스템개발에 있어서는 이들 시스템공학 데이터베이스의 구축 및 재사용으로 생산성 및 효과성이 증대될 것이다.

하지만, 시스템공학이라는 정형화된 프로세스와 방법론

을 실제 시스템 개발에 적용하는 사실상 국내 첫 사례이기 때문에 무수한 시행착오를 겪었다. 특히 어려운 점은 경량전철 사업에 참여하고 있는 대부분의 업체들이 시스템공학이 무엇인지 이해하지 못하고 있으며, 시스템공학을 성공시키기 위해 기본적으로 수행되어야 할 동시공학 통합 팀의 운영이 활성화되지 못한다는 데 있다. 우리나라에서 시스템공학이 뿌리를 굳건히 내리기 위해서는 다음과 같은 극복해야만 하는 장벽이 있다. 첫째, 시스템공학에 대한 오해를 불식시켜야 한다. 둘째, 시스템공학의 전문성을 인정받아야 한다. 전문공학만을 학문으로 여기는 우리 학계의 풍토에서 여러 분야를 균형 있게 융합하는 제품 개발 기술을 다루는 시스템공학이 학문의 한 분야로 인정받기가 쉽지 않다. 셋째, 많은 사례를 만들어 시스템공학의 효용성을 인정받아야 한다.

향후 과제로는 본 논문에서 다루었던 수준 이상의 거동 분석과 함께 상위 시스템의 성능 해석이 이루어져야 할 것이며, 관리적인 면에서 볼 때, 업무 조직과 공정을 정의하여 WBS와 연결시키는 작업을 수행해야 한다. 그리고, 시스템이 제작되고 난 후의 시험/검증/통합 작업을 위한 프로세스 개발 및 요구사항 분석이 수행되어야 할 것이다. 보다 근본적이고도 장기적인 임무로는 많은 사례를 만들어 가면서 한국 실정에 맞는 시스템공학을 제창조하는 일이다.

#### 참고문헌

- [1] 이한준, 유정복, 이종호, 김무정, 경량전철의 개발추이와 도입방안, 교통개발연구원, 1997, 12.
- [2] 한국철도기술연구원, 경량전철시스템 기술개발사업 1차년도 연구결과보고서(분야 : 종합시스템엔지니어링), 건설교통부, 1999, 12.
- [3] 고등기술연구원, (주)대우자동차, 전산보조 시스템 설계 및 개발기술 최종보고서, 과학기술부, 1998, 10.
- [4] 박종선, "시스템공학 전산지원도구를 이용한 시스템 설계 및 관리 데이터의 통합 정보화," 아주대학교 석사논문, pp. 31-32, 8. 2000.
- [5] James N. Martin, *Systems Engineering Guidebook*, CRC Press, New York, 1997.
- [6] Young Won Park, Hae Sang Song, and Heung Chae Chung, "Traceability in a unified systems engineering framework for A High-Speed railway system," *Proc. of the 10th International Symposium of the International Council on Systems Engineering*, pp. 43-47, 2000.
- [7] Dennis M. Buede, *The Engineering Design of Systems*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000.
- [8] INCOSE, *System Engineering Handbook*, INCOSE, 1998.
- [9] Robert Shishko and Robert G. Chamberlain, *NASA Systems Engineering Handbook*, NASA, 1992.



#### 박 중 응

1967년 5월 15일생. 1991년 서울대 항공공학과 졸업. 동대학원 석사(1993), 아주대 시스템공학 박사 수료(2000). 2000년~현재 고등기술연구원 생산기술센터 연구원. 관심분야는 시스템 엔지니어링, 요건공학, 비용분석.



#### 박 영 원

1945년 11월 13일생. 1968년 한양대 전자공학과 졸업. Oklahoma State Univ. 석/박사(1973/76). McDonnell Douglas Aerospace 근무(1976~1996). 1996년~현재 아주대학교 시스템공학과 교수. 관심분야는 시스템 엔지니어링, 시스템 설계, 추정 이론.