

시스템 엔지니어링에 기초한
도시형 자기부상열차 실용화 타당성 조사 사업의
수행방법 연구

A Study on the Method of the Project for Feasibility Study to
Practical Use Urban Transit Maglev Based on System
Engineering

한국생산기술연구원, 융합기술개발단, 수석연구원, 정회원 정경렬

한국생산기술연구원, 융합기술개발단, 연구원, 정회원 윤세균

한국생산기술연구원, 융합기술개발단, 연구원, 정회원 박철호

1. 서론
2. 시스템 수명주기와 타당성 조사 사업
 - 2.1 시스템 수명주기
 - 2.2 시스템 생명주기에서 "Pre-Phase"의 역할
3. "Pre-Phase"를 응용한 타당성 조사 사업 수행 방안
 - 3.1 프로젝트 및 제품의 목적 정의(Definition of project or product objectives)
 - 3.2 임무 정의(Mission definition)
 - 3.3 기능 요구사항의 정의(Definition of functional requirements)
 - 3.4 대안 아키텍처의 정의(Definition of candidate architectures)
 - 3.5 요구사항의 할당(Allocation of requirements)
 - 3.6 대안 비교 및 선정(Tradeoffs and selection of preferred design concept)
4. 결론

1. 서론

자기부상열차(磁氣浮上列車, MAGLEV : Magnetically Levitated Vehicle)는 자기력으로 차량을 지지(부상)하고 가이드웨이 상에서 자기장에 의해서 일정한 갭(gap)을 유지하면서 선형전동기로 추진하는 새로운 형태의 교통수단이다. 즉 일반 철도차량에 사용되는 차륜이 존재하지 않으며, 견인모터가 차량 자체에 탑재되어 있지 않고 트랙에 설치되어 있다. 이러한 원리로 움직이는 도시형 자기부상열차는 레일과의 비접촉에 따른 우수한 주행특성과 저소음, 저공해성을 지닌 첨단 교통수단이라는 장점 때문에 20여 년 전부터 현재까지 독일, 일본, 영국 등을 중심으로 활발한 실용화 모델 개발이 진행되어 오고 있다.

국내의 자기부상열차 기술은 1985년부터 1991년까지 구 현대정공 및 구 대우중공업에 의해 민간주도로 개발되었으나 실용화에 이르지 못했다. 1990년부터는 한국기계연구원 내에 국책연구사업단이 출범하여 당시까지 산발적으로 진행되어 온 자기부상열차 관련 연구가 체계화되기 시작했다. 1989년부터 1999년까지 국책 1, 2, 3단계를 거치며, 곡선궤도 및 분기기를 포함한 시험선로가 건설되고 량 당 60명 정도가 탑승 가능한 시험차(UTM-01)가 제작/운행되었다. 현재는 (주)로템을 주관으로 차량의 실용화 모델을 개발하는 중기거점 사업이 진행되고 있으며 국내 자기부상열차 기술의 정

착을 위한 실용화 사업이 추진되기에 이르렀다.

현재 추진 중인 도시형 자기부상열차 실용화 사업과 관련하여 실용화 사업의 적합성 여부를 판단하고 실용화 사업에 필요한 업무 및 추진체계와 평가방법 등을 제안하는 “도시형 자기부상열차 실용화 사업 타당성 조사” 사업이 진행되고 있다. 본 논문에서는 시스템 엔지니어링 관점에서 자기부상열차 실용화 타당성 조사 사업의 접근방법 및 수행업무에 관하여 고찰해보고자 한다.

2. 시스템 수명주기와 티당성 조사 사업

2.1 시스템 수명주기

국제 시스템엔지니어링 협회(INCOSE)에서 발간한 핸드북에는 미 국방성, 우주항공국(NASA), 비정부 영리기업 등 다양한 개발 기관의 시스템 수명주기에 대한 비교자료[그림 1]가 수록되어 있다. 그 가운데, 국내 도시형 자기부상 열차 실용화 사업의 규모, 연구개발 현황, 이해당사자(획득자, 사용자, 개발자)들의 관계를 볼 때 미 국방성(DoD)의 시스템 수명주기 자료가 자기부상열차

Typical Non-DoD Gov't Agency	User Requirements Definition Phase	Concept Definition Phase	System Spec. Definition Phase	Acq. Plan. Phase	Source Select. Phase	System Implementation Phase		Deployment Phase	Ops. and Maint. Phase	Deactivation Phase
DoD	Pre-Phase 0 Determination of Mission Need	Phase 0 Concept Exploration	Phase 1 Program Definition & Risk Reduction	Phase 2 Engineering and Manufacturing Development		Phase 3 Production, Fielding / Deploy & Operational Support				
Typical Intel Task Force	Issues Definition Period			Research Period			Dissemination Period			
	User Requirements Definition	Research Concept Definition	Intelligence Use Specification	Collection Planning Phase	Collection & Analysis Phase	Draft Report Phase	Publication Phase	Distribution Phase		
NASA	Pre-Phase A Advanced Studies	Phase A Preliminary Analysis	Phase B Definition	Phase C Design	Phase D Development		Phase E Operations			
Typical High Tech Commercial (Non-Gov't. Business)	Product Requirements Phase		Product Definition Phase	Product Devel. Phase	Eng. Model Phase	Intern. Test Phase	Extern. Test Phase	Production Phase	Manufacturing, Sales, and Support Phase	
Typical Control Gates	2		2	1		1		1	1	1
	New Initiative Approval		System Concept Approval	Development Approval		Production Approval		Operational Approval		

Provided courtesy of CSM

사업과 가장 유사한 것으로 판단된다.

그림 1. 시스템 수명주기 단계의 비교

그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 미 국방성, NASA 및 기타 기업들의 개발 프로세스들이 서로 많이 다른 것처럼 보일 수 있으나 다음과 같은 측면에서 유사한 점을 발견할 수 있다.

- 개발 사업 초기에 대상 시스템의 개념이나 고객의 요구사항을 최대한 명확히 정의하고 시스템의 구상을 시작한다.
- 시스템의 물리적 아키텍처를 결정하기 전에 기능적(혹은 논리적) 아키텍처를 결정하는 것이 바람직하다.
- 시스템 개발의 가장 초기 단계부터 운영과 폐기에 이르는 전체 수명 주기를 고려하는 관점을 유지해야 한다.

2.2 시스템 생명주기에서 “Pre-Phase”의 역할

표 1은 미 국방성(DoD)의 개발 표준 수명주기 프로세스를 나타낸다. DoD에서는 수명주기 프로세스를 크게 5개 Phase로 구분하며 본격적인 시스템 개발은 “Phase 0”에서부터 수행된다. “Pre-Phase”는 본격적인 개발이 수행되기 이전 단계로써 새로운 시스템 혹은 기존의 시스템의 수정 및 개선에 대한 요구를 감지하기 시작한다.

이와 동일한 맥락에서 “도시형 자기부상열차 실용화 사업 타당성 조사” 사업은 향후 실용화 사업 추진시 국제 경쟁력을 가질 수 있는 시스템 사양은 무엇이며 이를 달성하기 위해서 부족한 사항과 주어진 예산 속에서 달성 가능한 것인지를 판단하기 위한 사업이다. 이는 미 국방성(DoD)의 표준 개발 프로세스에서 “Pre-Phase”에 속하는 활동으로 볼 수 있다.

수명 주기 단계	Pre-Phase	Phase 0	Phase 1	Phase 2	Phase 3
	개념단계 이전 (타당성 조사)	개념탐색	프로그램 정의 및 리스크 감소 활동	공학적 활동 및 양산 시스템 개발	생산, 현장 전개 및 배치, 운영지원
프로그램 활동	<ul style="list-style-type: none"> 프로젝트 및 제품 목적 정의 임무 정의 기능 요구사항 정의 대안 아키텍처 정의 요구사항의 할당 대안 비교 및 선정 	<ol style="list-style-type: none"> 시스템 분석 요구조건 정의 개념 설계 기술 및 위험도(risk) 평가 선정된 개념에 대한 예비 비용, 일정, 성능 평가 	<ol style="list-style-type: none"> 개념 설계의 개선(update) 하부시스템 대안 선정 예비 설계 프로토타이핑, 시험 및 평가 제조 및 지원성 고려 요소를 설계 활동에 통합 	<ol style="list-style-type: none"> 상세 설계 개발 위험도(risk) 관리 개발 시험 및 평가 시스템 통합 후 시험 및 평가 양산 프로세스 검증 	<ol style="list-style-type: none"> 생산을 검증 운영 시험 및 평가 배치 운영 지원 및 성능 개량 폐기 대체 계획

표 1. 미 국방성(DoD)의 표준 개발 프로세스

“Pre-Phase” 단계는 간략하고 정형화되어 있지 않은 아이디어나 짧은 인가서의 수준에서 시작될 수도 있다. 그리고 기술적 지침이나 요구사항 등에 대한 자료가 없을 수도 있다. 다행히 자기부상열차의 경우 국내에서 기술개발이 수행된 바가 있고, 일본의 HSST 시스템이 매우 유사한 사양으로 개발되어 현재 상업운영 중이기 때문에 이에 관한 기술 자료 일부가 활용될 수 있다.

3. “Pre-Phase”를 응용한 타당성 조사 사업 수행 방안

본 항에서는 시스템 개발 생명주기 중 “Pre-Phase” 단계에서 수행되어야 하는 업무를 열거하고 이러한 업무들을 “도시형 자기부상열차 실용화 사업 타

당성 조사” 사업에서는 어떻게 수행하였는지에 대해 소개한다.

3.1 프로젝트 및 제품의 목적 정의

(Definition of project or product objectives)

국내의 경우, 도시의 대중교통 수단은 크게 버스와 중전철(지하철, 수도권 전철)이 이용되고 있다. 버스는 기존의 도로 위에서 운용되므로 노선적용성이 매우 높고, 건설비용이 절약된다. 하지만 내연기관 사용으로 인한 공해문제가 심각하고 교통정체를 증가시키는 단점이 있다. 또한 철도시스템에 비해 표정속도가 매우 낮고 수송능력이 적은 것이 단점이다. 중전철의 경우 표정속도도 양호하고 수송능력도 뛰어나지만, 건설비용이 많이 들고, 밀폐된 공간에서 차륜마모로 인해 분진이 발생하는 단점이 있다. 따라서 자기부상열차는 중전철보다 낮지만 버스보다는 높은 수송용량을 제공할 수 있어야 하며, 소음과 공해

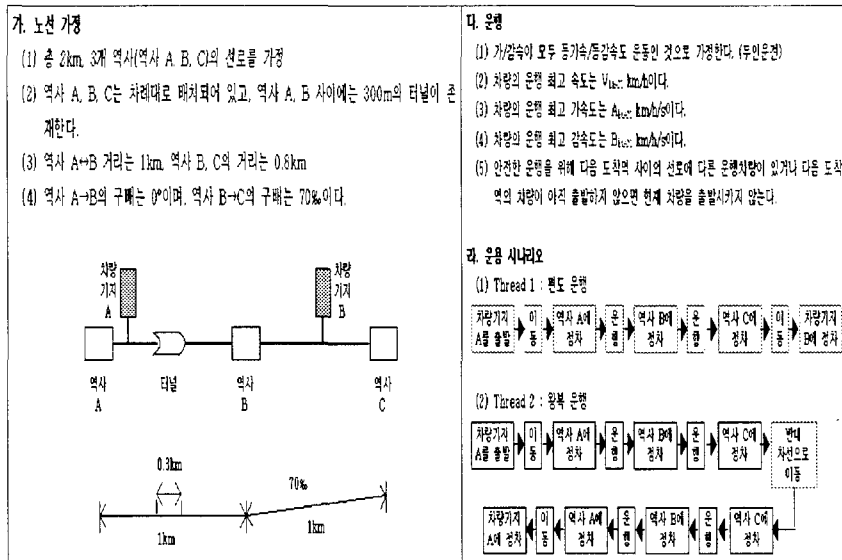
등에서 미래의 도심 교통 시스템에 걸맞는 능력을 목표로 해야 한다.			
수송용량	2만명 이상/시간, 방향	5천~2만명/시간, 방향	1~5천명/시간, 방향
차량편성	6~10량	1~6량	1대(굴절버스 2량)
차량정원	150~160명	40~80명	80명
운행간격	2~3분	30초~2분	7~9분
회전반경	최소 400mR	최소 40~80mR	최소 13mR
등판능력	최대 2.5%	최대 6~9%	최대 15%
표정속도	30~35km/h	30~40km/h	18.53km/h(서울시)

구 분 지하철(중전철) 자기부상열차(경전철) 버스
 표 2. 중량전철, 경량전철, 버스 등의 노선적용성 및 승객 수송 능력

3.2 임무 정의(Mission definition)

본 사업에서는 자기부상열차의 시스템 요구사항을 도출하기 위한 노력의 일환으로 운영개념서(Operating Concept Document)를 작성하고 있다. 여기에서 시스템의 임무와 운영개념이 최대한 명확히 작성된다. 본 사업에서는 구

체계적인 적용노선이 정해져 있지 않기 때문에 일본의 상용화된 자기부상열차 노선을 참조로 대상지역을 가정하고 기존 철도 시스템의 운영 자료를 기반으로



로 시스템의 운영개념과 임무를 정의할 것이다.

그림 2 시스템 운영개념 및 임무 정의 과정 예

3.3 기능 요구사항의 정의(Definition of functional requirements)

요구사항의 분류는 저자와 조직에 따라 조금씩 다를 수 있지만, J. M. Martin의 “Systems Engineering Guide Book”에 의하면 간략히 표 3과 같이

정의될 수 있다.			
영문표기	Functional Requirement	Performance Requirement	Constraint
설명	시스템에 필요한 기능을 규정한다.	시스템이 발휘해야 하는 성능을 규정한다.	시스템이 개발, 운영, 폐기 과정에서 준수해야 할 내용을 규정한다.
예제	시스템은 만차 시에도 안정적인 부상이 가능해야 한다. 최대 2.5%	시스템은 량당 최대 251kN 이상의 부상력을 제공해야 한다. 최대 6~9%	시스템은 외기온도 -25 ~ +40°C에서 정상적인 성능을 발휘해야 한다.

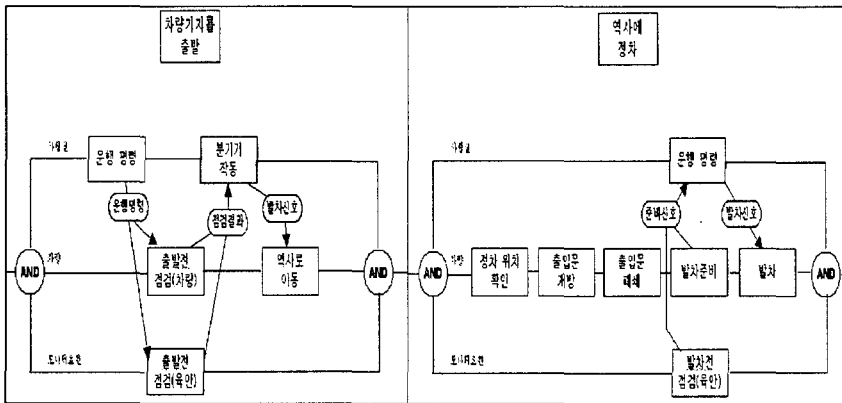
기능 요구사항

성능 요구사항

제약사항

표 3. 요구사항의 분류 (J. M. Martin)

기능 요구사항은 기본적으로 시스템 운영개념의 정의로부터 도출된다. 도 시형 자기부상열차는 부상 및 추진방식에 새로운 첨단 기술이 사용되지만 근본적으로 시스템의 특성이 전철이기 때문에 기존의 기능 요구사항에서 큰 차이가 있지 않을 것으로 예상되므로 기존에 구현된 많은 전철 시스템의 설계정보들을 기능 요구사항 정리에 반영할 것이다. 다만 무인운전 시스템의 경우 기존에 실용화되지 못했던 개념이며 기능 요구사항이 설계에 가장 큰 영향을 미치는 소프트웨어 중심 시스템이다. 따라서 무인운전 시스템에 관련된 요구사항은 시스템 운영개념의 정리에 의해 많은 영향을 받을 것으로 예측된다. 기능 요구사항의 도출은 SE에서 중요한 개념 설계 과정 중 하나인 기능 분석



(Functional Analysis)을 통해 이루어지게 된다.
그림 3. 기능 분석(Functional Analysis) 예

3.4 대안 아키텍처의 정의(Definition of candidate architectures)

대안 아키텍처를 정의하는 단계는 시스템의 목적에 부합할 수 있는 다양한

가능성을 제안하는 단계이다. 본 사업은 개발 대상이 도시형 전철이라는 시스템의 특성상 본 시스템의 물리적/기능적 아키텍처가 거의 고정되어 있다. 또한 본 사업의 특성상 기존 자기부상기술의 연구결과를 활용해야만 하기 때문에 시스템의 해결방안에 있어서도 다양한 대안이 나오기 어렵다.

그러나 대상 시스템의 아키텍처가 상당부분 정해져 있기 때문에 시스템을 비교적 깊이 있게 이해하는 일이 가능하다. 따라서 본 타당성 조사 사업에서는 개념 개발 단계 이후에 정의할 수 있는 제품 구성 체계(Product Breakdown Structure)를 상당 수준 미리 정의할 수 있었으며 또한 이러한 제품 구성 체계를 기반으로 업무 구성 체계(Work Breakdown Structure)를 정의하였다. 이와 같은 시스템 개발 초기 문서들은 향후 실용화 사업의 개발 추진 체계를 구상하는데 활용할 수 있다. 이와 같은 SE(System Engineering) 관련 문서들은 내용의 무결성을 확보하는 방안 중의 하나로 특별한 제약이 존재하지 않는 한국제 표준이나 미 국방부의 권고 사항을 참조하여 작성될 예정이다. WBS의

경우 MIL-HDBK-881을 참조하였다.

레벨 1 도시형 자기부상열차 시스템

레벨 2	레벨 3	레벨 4	설 명
차량	구체		차체를 구성하고 있는 주요 구조부분
		하부구조	차체 하부를 구성하는 구조물
		측구조	차체 측면을 구성하는 구조물
		전두구조	전두부를 구성하는 구조물
		단부구조	차량 앞뒤의 벽 구조물
		지붕구조	차체 지붕을 구성하는 구조물

3. WBS 분류

식별번호 ML-0-00-00 레벨 1, 도시형 자기부상열차 시스템

식별번호	레벨 2	레벨 3	레벨 4	비고
ML-1-00-00	프로젝트 관리			
ML-1-01-00		프로젝트 계획		
ML-1-02-00		프로젝트 진도 관리		
ML-1-03-00		협약 관리		
ML-1-04-00		리스크 관리		
ML-2-00-00	시스템 엔지니어링			
ML-2-01-00		개념설계		
ML-2-01-01			운영모달 개발	

그림 4. 자기부상열차의 PBS 예

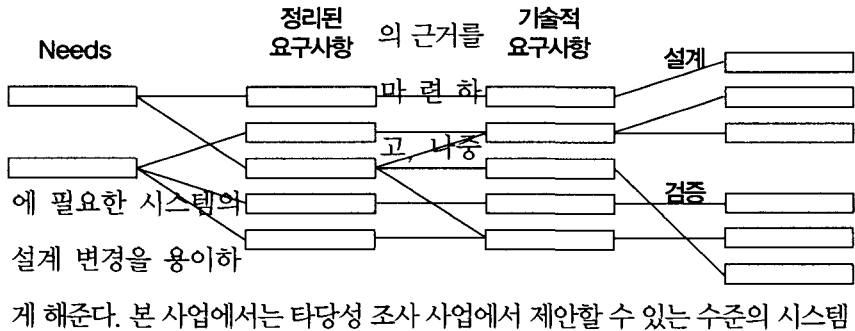
그림 5. 자기부상열차의 WBS 예

3.5 요구사항의 할당(Allocation of requirements)

요구사항은 운용개념을 통해 시스템의 모든 이해관계자들로부터 수집되어야 한다. 예를 들어 유지보수에 관련된 요구사항을 개발 단계에서 누락하였다면 그 시스템은 운영 단계에서 예상보다 많은 비용이나 인력/시간을 소비해야만 할지도 모르는 위험을 안고 있다.

또한 모든 요구사항들은 설계방안으로 추적성을 가지고 있어야 한다. 예를 들어 소비전력이 줄어들기 바라는 운영기관의 요구사항은 시스템 사양서에서 차량의 소비전력이나 타 차량의 회생제동 시간과 발차 시간을 맞추는 등의 내용으로 정리될 것이다. 이런 식으로 요구사항 관리 소프트웨어나, 문서 등을 통해 모든 설계 활동의 원인에 대한 추적성이 수립되어야 한다.

초기 시스템 이해관계자의 요구(Needs)에서 시스템 요구사항으로 시스템 요구사항에서 시스템 사양서로, 그리고 하부 시스템 설계 사양으로, 추적성을 확보하는 것이 바로 요구사항의 할당이다. 따라서 이 과정은 시스템의 설계방안

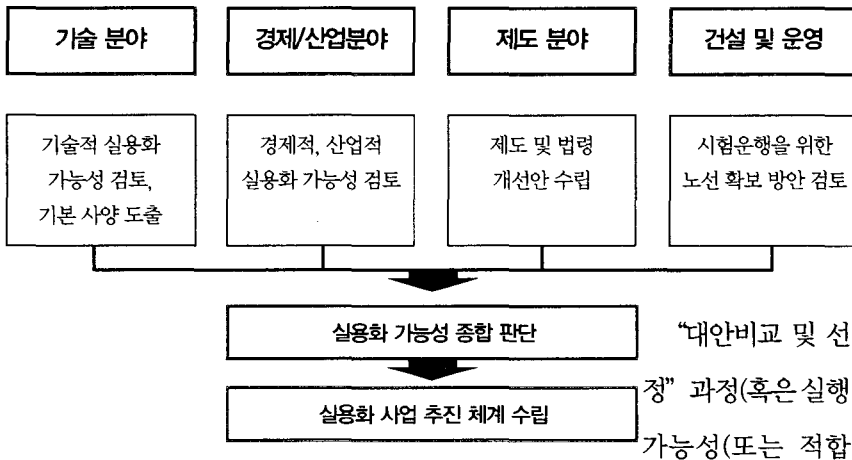


시양서를 작성할 것이고, 그 과정에서 요구사항의 할당 과정이 자연스럽게 수행될 것이다.

그림 6 요구사항의 할당 개념

3.6 대안 비교 및 선정

(Tradeoffs and selection of preferred design concept)



성)분석과정, Feasibility Analysis)은 “대안 아키텍처의 정의”과정에서 있었던 다양한 해결방안들에 대한 비교평가를 수행하여 가장 우수한 대안을 선정하는 과정이다. 또한 이는 채택된 아키텍처와 시스템 개념의 근거를 확보하는 과정이기도 하다.

도시형 자기부상열차 사업은 시스템 구현에 대한 다양한 대안이 존재하는 것은 아니며 기존 연구를 통해 보유하고 있는 기술을 기반으로 실용화 사업을 추진하려는 것이기 때문에, 본 과정에서는 다양한 대안의 비교 선정보다는 현재의 기술 상황에서 실용화 사업이 타당성을 갖는지를 식별하도록 하였다. 실용화 사업에 대한 타당성 평가는 그림 7과 같은 체계로 추진되고 있다.

그림 7. 도시형 자기부상열차 실용화 사업에 대한 타당성 평가 체계

국내의 경우 자기부상열차의 실용화 사례가 없으며, 도시형 자기부상열차가 실용화된 경우는 일본의 HSST가 유일하다. HSST의 경우 기술적인 평가가 우수하기 때문에 목표 사양 선정 및 이에 따른 기술적 타당성 조사에서는 일본의 HSST를 기준으로 국제적인 경쟁력을 갖는 것을 최우선 과제로 삼고 있다.

4. 결론

본 논문에서는 SE 관점에서 시스템 개발 사업 이전에 수행되어야 하는 활동들을 살펴보고 이를 토대로 “도시형 자기부상열차 실용화 사업 타당성” 사업의 수행방법에 대해 연구하였다. 도시형 자기부상열차의 실용화에 따른 긍정적/부정적 파급효과를 면밀히 검토하고 실용화 사업의 추진 여부를 판단하는데 필요한 모든 자료를 개발하여 타당성 조사 사업의 체계적인 수행방안을 도출하고자 하였다.

국내에서 추진되는 대형/복합 시스템 개발 사업은 대체로 국내/외의 기존 시스템을 참고하여 수행되기 때문에 개발 기간이 선진국에 비해 단축될 수 있는 반면, 시스템의 운영 개념 수립, 요구사항 획득 및 할당과 같은 업무가 상대적으로 미비할 수밖에 없다. 이는 철도 분야 역시 마찬가지이다. 이와 같은 시스템 개발 초기 노력의 부족은 곧, 시험/검증 체계의 미흡, 독자적이고 무결한 개발 능력과 프로세스의 부재 등으로 이어진다. 본 사업에서는 이와 같은 개발 초기 수행업무의 일환으로 시스템 운영 개념 외에도 요구사항 획득 및 분석을 통한 시스템 사양서를 개발하고, 최종적으로 시스템엔지니어링 개념에 입각한 사업 추진 체계를 제시할 것이다.

ABSTRACT

This study is about a feasibility study for the practical using Urban Transit Maglev system based on systems engineering. First of all we defined what phase is matched with the project for feasibility study in the system life cycle and identified tasks that shall be done in the phase. Finally we suggested how to do in this project. The Urban Transit Maglev system is not wholly new system. It has similar architecture to a legacy urban railway system. But it is the system that is partially introduced new technology, because there are many projects have this characteristic within the country, we expect that this study may provide references.

참고문헌