

소형궤도열차시스템 모의시험 및 분석

Simulation and Analysis for Small Rapid Transit System

정락교* 김연수** 조봉관*** 최효정****
Jeong, Rag Gyo Kim, Yeon Soo Cho, Bong Kwan Choi, Hyo Jeong

ABSTRACT

Small Rapid Transit System(SRTS) will be defined fully automated urban transit system providing a rapid and personalized door to door transport service. Conventional forms of public transit require passengers to collect in groups until a large vehicle is scheduled to travel on predetermined routes. In contrast, SRTS offers personal transport with no waiting, and takes passengers non-stop to their chosen destination. This is a transport system which is as convenient as, or in congested environments more convenient than, the car, but with minimal environmental impact. Accordingly the foundation study of choice system size for development of SRTS

1. 서론

소형궤도열차는 전용의 궤도 위를 제어장치에 의해 목적지까지 무정차 주행하는 무인운전 시스템이다. 개인대중교통수단, 개인궤도수송시스템, 궤도택시, 스카이택시, 무인자동택시 등으로도 불리는 시스템으로 국외에서는 Personal Rapid Transit(PRT) 또는 Group Rapid Transit(GRT) 등의 용어로 불리운다.

1970년 세계 최초로 West Virginia의 Morgantown에 West Virginia대학의 학생통학 및 지역사회 교통수단으로의 소형궤도열차 시스템이 개발되어 건설되었으며, 1975년 세계 최초의 실용 운영을 시작한다. 그러나 이 시스템은 차량 하나 당 20인 이상의 다수 승객이 탑승하고 선로도 단순화 되어 있어 소형궤도열차시스템으로 간주할 수는 없으며 GRT(Group Rapid Transit)의 일종으로 볼 수 있다. 미국 이외에도 영국의 Cabtrack, 독일의 Cabintaxi, 프랑스의 Aramis 등의 소형궤도열차시스템 개념을 가진 무인교통시스템 개발 프로젝트가 진지하게 진행되었다.

1993년 미국의 Raytheon Company는 TAXI 2000 이라는 소형궤도열차 시스템의 특허를 사들여 일리노이 주정부의 교통당국으로부터 소형궤도열차 시스템의 시범운영에 대한 허가를 얻어내고 1995년 Rosemont 지역에 시험선을 건설하여 시험운행을 완료하였으나 2000년 관련 사업을 전면 보류함으로써 사업권과 시험선 시설이 York PRT에 매각된 뒤 개발이 중단되었다.

70년대를 정점으로 20세기 말 침체기를 겪었던 소형궤도열차시스템 개발 노력은 정부의 예산 삭감 등을 이유로 장기간 보류되었으나, 최근에 들어 도심교통체증 문제를 해결하기 위한 방안으로서 저비용 고효율 교통시스템의 적용타당성을 긍정적으로 검토하는 추세에 힘입어 시스템 개발 움직임이 활발하게 재개되고 있다.

한편, Bristol 대학에서 출발한 Advanced Transport Systems사에서 개발한 소형궤도열차 시스템인 ULTra(Urban Light Transport)는 Cardiff시에 1km의 시험선을 건설하고 HMRI로부터 Public Ride 인증을 획득하였다. ULTra는 2003년 이래 1,000회 이상의 시험운행을 거쳐 2008년 Heathrow 국제공항에 적용을 목표로 사업을 진행 중에 있다.

* 정락교 책임연구원, 정회원, 한국철도기술연구원/첨단교통기술개발사업단
E-mail : rgjeong@krri.re.kr
TEL : (031)298-0336 FAX : (031)298-0336
** 김연수 선임연구원, 정회원, 한국철도기술연구원/첨단교통기술개발사업단
*** 조봉관 선임연구원, 정회원, 한국철도기술연구원/첨단교통기술개발사업단
**** 최효정 선임연구원, 비회원, (주)벡터스/연구소

그 밖에 스웨덴, 노르웨이, 오스트레일리아 등 선진 각 국에서 소형케도열차 시스템의 개발을 진행하려는 노력이 점점 구체화되고 있으며 제어방식, 시스템 구성, 기본요소 기술에서 다양한 양식의 소형케도열차시스템개념들의 연구가 진행되고 있다. 각 국 정부에서도 미래교통수단으로서 소형케도열차 시스템의 개발 가능성 및 적용 타당성을 심도 있게 연구하고 있다.

국내에서는 1990년대 초반 후보 엔지니어링(이후 PRT Korea)에서 소형케도열차시스템의 타당성 조사 및 사업화를 추진하였으나, 사업화에는 성공하지 못하였다. 현재는 Vectus에서 In-track 추진방식의 4인승 소형케도열차 시스템의 개발에 박차를 가하고 있으며, Sweden Uppsala 지역에 Test Track 건설을 추진 중에 있다.

기존시스템을 분류하여 시스템을 분석하고 이를 토대로 기존 시스템 방식 중 보편적인 사양을 조합하여 규모별 비교를 위한 표준 소형케도열차시스템 공통사양을 도출하였다. 소형케도열차시스템의 특성이 비교적 잘 드러날 수 있는 서비스 지역 면적과 평균 역사 배치 간격, 표준 선로 네트워크의 총 연장 및 구조를 다음과 같이 동일하게 설정하여 분석하였다.

2. 본문

2.1 기존시스템의 분류

현재 소형케도열차는 다양한 형태 및 규모로 개발되고 있으며, 그 형태 및 규모에 따라 다양한 사양이 요구되고 있다. 개발되거나 제안된 개념의 소형케도열차는 크게 3~5인 정원의 소형케도열차와, 9~21인 정원의 GRT, GRT 이상의 정원을 갖는 APM으로 분류할 수 있으며, 그 종류는 다음과 같다.

표 1 소형케도열차 시스템의 종류

구분	PRT	GRT	APM
System	SkyWeb Express, ULTra, PRT2000, Skycab, MAIT, EcoTaxi, Microrail, etc.	Austrans, Mogantown PRT, MAXI-RUF etc.	IMATA, Bombardier, HMI, Alcatel, VAL, K-AGT, etc.
승차인원	2 - 5명	9 - 21명	-
최대속도	45 - 100km/h	48 - 70km/h	80km/h
Line 용량 (Average)	2,500 - 5,000 pphpd	4,000 pphpd	16,000 pphpd
운행시격	0.5~2.5 seconds	15 seconds	60~120 seconds
운영개념	Off-line station Non-stop trip	Off-line station	Line-haul System
추진시스템	LIM, LSM, Electric motor, Magnet motor, etc.	Electric motor, Rotary Motor, etc.	LIM, Rotary Motor, etc.

표 2 소형케도열차 시스템의 규모별 분류

규모 구분	구분기준			System (Vendor)
	승차인원	운영행태	차량길이	
초소형	3명이하	Off-line station Non-stop trip	3m 이하	SkyWeb(Taxi2000), SkyCar(PRT Korea)
소형	4 명	Off-line station Non-stop trip	3m - 4m 이하	PRT2000(Raytheon), ULTra(ATS), Sky Cab, MAIT, CabinTaxi(CabinTaxi), Microrail(Megarail), M ³ (MagneMotion) CyberCab(2GetThere), EcoTaxi(EcoTaxi) Vectus PRT(Vectus)
중소형	9 - 21명	Off-line station	4m - 5m	MorgantownPRT(Boeing), Austrans (Bishop Austrans), Megarail (Megarail) MAXI-RUF(RUF International)
중형	25명 이상	Line-haul System	5m 이상	IMATA(Toyota), K-AGT(KRRI), Bombardier, HMI Alcatel, VAL

2.2 적합성 분석

기존 시스템 방식 중 보편적인 사양을 조합하여 규모별 비교를 위한 표준 소형케도열차시스템 공통사양을 도출하였다. 특히, 차량의 규모 산정에 있어서 일관된 가정이 적용되어야 할 항목은 시스템 적용 규모이다. 따라서 각 표준 시스템의 비교 분석 시, 소형케도열차시스템의 특성이 비교적 잘 드러날 수 있는 서비스 지역 면적과 평균 역사 배치 간격, 표준 선로 네트워크의 총 연장 및 구조를 다음과 같이 동일하게 설정하였다.



그림 1 소형케도열차시스템 표준적용 선로네트워크 및 역사배치

2.2.1 시스템 공통사양(안) 도출

표 3 표준시스템 공통사양(안)

구분	공통 사양(안)
설치 및 운영조건	<ul style="list-style-type: none"> ● 설치조건: 선로(실외) ✓ 역사(실내, 개방형 구조)
	<ul style="list-style-type: none"> ● 동작환경: <ul style="list-style-type: none"> ✓ 기온(-25°C~+45°C), 습도(5%~100%) ✓ 풍속(정상주행 < 연속12.5 m/s, 저속운행 < 연속50m/s) ✓ 강우(120mm/h), 강설 (125mm/h)

구분	공통 사양(안)
	<ul style="list-style-type: none"> ● 수요 변동형 24시간/7일 연속 운행
System	<ul style="list-style-type: none"> ● 표본 Service Area: 2.25 km² ● Connectivity: 모든 역간 운행성 확보 ● 출발지/도착지 간 무정차 운행 가능 ● 주 선로에서 그룹주행(Platooning) 배제 ● 차량 배치 및 운행 경로는 수요 및 선로 네트워크 상황에 따라 동적 중앙제어 방식으로 결정됨. ● 별도차량기지에 의해 전체차량대수조절 및 유지보수 기능 수행 ● 주선로 고정 시격, 고정 속도 운행 ● 장애인 및 화물 수송 가능
차량	<ul style="list-style-type: none"> ● 무인 운전 시스템 ● 모두 Seated Service를 제공함. ● 모든 차량은 Network 전체에 걸쳐 운행 가능함. ● 차량 Door는 좌우측 각 한 쌍의 Sliding Door로 구성 ● 분기 및 비상제동 장치 장착됨.
궤도	<ul style="list-style-type: none"> ● 일반적으로 2층 이상의 고가 철구조물 선로로 구성됨 ● Supported Guideway 구조를 가짐 ● 기존 도로에서는 중앙 분리대 또는 인도 외측에 설치 ● 도로교통에 Exclusive한 교통 흐름 확보 ● Unidirectional Network 선로로 구성됨 ● 주선로와 역사와 연결된 Offline 선로로 구성됨 ● 교차로 없이 선형 분기 및 합류가 이루어짐
역사 (운영)	<ul style="list-style-type: none"> ● 평균 역사 간격: 500m, 최소 역사 간격: 200m ● 각 선로 Link 당 1~2개의 역사가 배치됨 ● Offline Guideway에 설치되는 무인 운영 역사 ● 기존 건물에 통합되거나 별도 역사 건물 설치 가능 ● 복수의 정차대(Berth)를 가진 단일 Platform ● Platform 전후에 출입차량 대기열(Input/Output Queue) 선로구성 ● Platoon 단위로 승하차를 동시에 처리할 수 있음 ● 선택적으로 좌우 문을 통해 승하차 동선 분리 가능 ● 역사차량흐름 및 수요발생 여부에 따라 종착역에서 정차대기가능 ● Screen Door에 의한 Platform과 선로 분리
전력 추진	<ul style="list-style-type: none"> ● 선형 유도 모터내지 영구자석 동기전동기 추진 ● 추진 전력은 유도급전내지 선로 상에 DC로 공급됨 ● 차상 보조전력은 Offline의 부분 제3궤조 및 Alternator 충전
제어 통신	<ul style="list-style-type: none"> ● 시격제어는 Brick-wall Stop Scheme을 따름 ● 비동기식/동기식 합류제어 적용 ● 경로생성은 중앙제어기에서 담당 ● 분기 및 합류 신호제어는 선로제어기에서 담당 ● 분기 장치제어는 차량제어기에서 담당 ● 주 제어 신호는 실시간 유선통신에 의해 전달됨 ● 차량-선로 간 신호는 분기, 비상정지 신호, 차량 운영 신호에 국한되며 무선통신에 의해 전달됨
안전성	<ul style="list-style-type: none"> ● 주요장치는 근본적으로 fail-safe로 구성 된다 ● 승객 전원 착좌, 안전벨트 착용 ● 차량 내 비상상황 시 사령실과 통화 가능

구분	공통 사양(안)
신뢰성	<ul style="list-style-type: none"> ● 차량 내 화재감시, 화재 감지, 안내 방송 장치 설치 ● 별도의 선로 탈출로는 고려하지 않음 ● 차량 내 승객 안전 탈출 장치 및 완강기 탑재
	<ul style="list-style-type: none"> ● 각 구성 장치는 MTBF로 관리됨 ● 차량 MKBSF는 30,000km 이상
	<ul style="list-style-type: none"> ● 주요 장치는 목적과 설치지역에 따라 모듈화 ● 1개의 단위 선로추진제어장치의 고장 시에도, 차량은 정상 운행이 가능하도록 설계됨 ● 비상상황 시, 비상상황이 발생한 국지적 역사, 선로 또는 차량을 제외한 나머지 시스템의 운영지장이 최소화 되도록 비상대응 알고리즘 구현
환승성	<ul style="list-style-type: none"> ● 2층 선로와 연결된 역사와 지하 교통수단 (지하철) 과 지상 교통수단 (버스) 승강장을 잇는 환승구 설치 ● 엘리베이터, 에스컬레이터, 무빙워크, 램프 계단을 통한 이동성 개선 ● 환승 교통수단의 경로 및 배차 안내 시스템

2.2.2 규모별 표준시스템 비교·평가 항목

연구 계획 단계에서, 규모별 시스템의 장단점을 비교 평가할 항목으로 다음의 7개 영역과 각 영역에 따른 세부 분석 항목이 검토되었다.

표 4 규모별 시스템 비교평가 항목

평가 영역	세부 분석 항목	
설치 적합성	선로 경사도	
	선로 최소 반경	
수송 능력	주 선로 수송량	
	역별 수송량	
	역간 수송량	
	비선형 수요 대처 능력	출퇴근 첨두시 대처능력, 도심/외곽 수요불균형 대처
서비스 품질	접근성 및 타 교통시스템과의 환승성	선로 배치 밀도, 역 진입 거리, 역 내 주차 공간
	운행 효율성	운행 경로, 평균 주행 속도, 운행 소요 시간
	사용자 중심 서비스	대기 시간, 무정차 주행 및 합승 여부, 승차감
	시스템 부하 균형	동적 경로 생성, 정체 회피, 비상 시 우회
건설 및 운영 경제성	거리 당 건설 단가	
	에너지 소비량	
	차량 점유율	
	최소 운영 인력 규모	
신뢰성 및 안전성	예외 상황 발생 빈도	
	이상상황 감지 및 무인 시스템 대응 능력	
친환경성	공사 편의성	
	시각적 방해	
	진동, 소음, 전자파	
기존 철도 기술 활용성	운영 개념 차이에 의한 기존 철도 기술 활용 정도	
핵심 기술 완성도	중앙 제어	네트워크 활용도, 흐름 제어
	구간 제어	최단 안전 시격, 비상제동
	추진 제어	속도 프로파일 제어, Jerk 제어

3. 고찰 및 결론

규모 별 표준시스템 모델링에 있어서 우선 주행성능(주 선로 속도, 최대속도, 최대 가감속 등)과 동작 환경(강풍, 운행시간 등)을 일반적으로 수용 가능한 소형케도열차시스템 사양으로 한정시키고, 최대 탑승 승객 수에 따른 차량의 물리적 요구사항을 각각 모델링하였다.

차량 규모별 적합성 분석에서 가장 중요하게 고려한 사항은, 일정한 요구수준의 수송능력을 확보하는 소형케도열차시스템을 구성하는 것이었다. 이를 위하여, 앞서 모델링한 각기 다른 물리적 사양을 가진 차량에 따라 이에 대응하여 요구되는 시스템의 궤도, 역사, 운영 및 제어 방식, 추진, 전력 등의 사양을 추가로 모델링하여 규모 별 표준시스템을 완성하였으며 표 4, 5 규모별 시스템 비교평가 항목 및 시스템규모별 적합도 산정기준을 토대로 분석하여 표 6의 결과를 도출하였다.

표 5 소형케도열차 시스템 규모별 적합도 산정 기준

구분		적합도 산정 기준
설치적합성	차량	$\min(\text{차량길이})/\text{차량길이} : * \min(\text{만차중량})/\text{만차중량}, * \text{설치제거용이성}(0.5:1)$
	궤도	$\min(\text{최소횡축회전반경})/\text{최소횡축회전반경} : * \min(\text{선로 폭})/\text{선로 폭}, * \min(\text{Column Size})/\text{Column Size}, * \text{Column Span}/\max(\text{Column Span})$
	역사	$\min(\text{역사길이}/\text{동시정차대수})/(\text{역사길이}/\text{동시정차대수})$
수송능력	최대수송량	$\text{주선로 최대용량}/\max(\text{주선로 최대용량}) : \text{역사처리용량}/\max(\text{역사처리용량})$
	비선형수요 대처능력	$\text{비첨두시 대처능력}(0.2:0.4:0.6:0.8:1) : * \text{첨두시 대처능력}(0.2:0.4:0.6:0.8:1), * \text{Bulk 승객 발생시 대처능력}(0.2:0.4:0.6:0.8:1)$
서비스 품질	접근성	$\min(\text{평균 역사밀도})/\text{평균 역사밀도}$
	운영효율성	$\text{표정속도}/\max(\text{표정속도}) : * \min(\text{공차운행비율})/\text{공차운행비율}, * \text{재차승객비율}/\max(\text{재차승객비율}), * \min(\text{정체빈도})/\text{정체빈도}, * \min(\text{Wave-off빈도})/\text{Wave-off빈도}$
	승객편의성	$\min(\text{최대Jerk})/\text{최대Jerk} : * \min(\text{평균승하차시간})/(\text{평균승하차시간}), * \text{합승}(1:0.5)$
	정시성	$\text{최단시간경로}(0.5:1) : * \min(\text{평형시 평균대기시간})/(\text{평형시 평균대기시간}), * \min(\text{평균운행지연시간})/(\text{평균운행지연시간})$
경제성	건설비용	$\min(\text{km당 기본시스템건설비용})/(\text{km당 기본 시스템 건설비용})$
	운영비용	$\min(\text{전력용량})/\text{전력용량}$
친환경성	시각저해	$\text{Column Span}/\max(\text{Column Span}) : * \min(\text{선로규모})/\text{선로규모}, * \min(\text{역사최소면적})/\text{역사최소면적}$
	소음	$\text{소음발생원인} * \text{차량빈도}$
핵심기술	중앙제어	$\text{경로차량배치복잡도}(0.5:1)$
	구간제어	$\text{제어차간거리}(0.5:1)$
	추진제어	$\text{레퍼런스속도변화}(0.5:1)$
난이도	통신	$\min(\text{거리당 통신 단말개수})/\text{거리당 통신 단말개수}$
	총계	평가항목 적합도 총합

표 5의 기준을 통해 각 분석항목에 대한 상대적 우위를 최저 0, 최고 1 평가하여 이를 합산함으로써 제반 사항을 모두 고려한 최적 차량 규모 사양을 도출하고자 하였다. 다만, 항목 별로 중요도와 데이터 신뢰성 등을 고려하여 Delphi 조사에 기반한 가중치를 부여할 경우 보다 적합도 산정 기준을 개선할 수 있을 것으로 예상된다. 아울러 개발 대상시스템 규모 선정의 기초자료로 사용될 수 있을 것이다.

표 6 소형궤도열차 시스템 규모별 적합도 평가 결과

구분		3인용	4인용	8인용
설치 적합성	차량	0.50	0.50	0.05
	궤도	0.85	0.73	0.50
	역사	0.78	0.66	0.64
수송능력	최대수송량	0.88	1.00	1.00
	비선형수요대처능력	0.15	0.25	0.30
서비스 품질	접근성	1.00	0.90	0.80
	운영효율성	0.19	0.25	0.25
	승객편의성	0.80	1.00	0.30
	정시성	0.83	1.00	0.72
경제성	건설비용	1.00	0.85	0.55
	운영비용	0.65	1.00	0.91
친환경성	시각저해	0.80	0.90	0.30
	소음	0.90	1.00	0.80
핵심기술 난이도	중앙제어	0.50	0.60	0.80
	구간제어	0.50	0.75	1.00
	추진제어	0.60	0.70	0.80
	통신	0.36	0.50	1.00
총계		11.28	12.59	10.73

4. 감사의 글

건설교통부의 지원하에 수행한 소형궤도열차시스템기술개발의 성과의 일부내용이며 지원에 감사드립니다

5. 참고문헌

1. Wayne D. Cottrell, Critical Review of The Personal Rapid Transit Literature, 2006, TRB
2. 도로·철도부문의 예비타당성 조사 표준지침 수정·보완 연구, 2004.09, 한국개발연구원
3. ASCE 21-96 Automated People Mover Standards Part1-3
4. Planner's Guide to Automated People Movers (2006/2007)