

# 자동 운전 PRT 차량의 무선 관제 기술 개발을 위한 가상 환경 기반 통합 시뮬레이터 개발

박 평 선\*, 김 현 명\*, 옥 민 환\*\*, 정 재 일<sup>o</sup>

## A VR-Based Integrated Simulation for the Remote Operation Technology Development of Unmanned-Vehicles in PRT System

Pyung-sun Park\*, Hyun-myung Kim\*, Min-hwan Ok\*\*, Jae-il Jung<sup>o</sup>

### 요 약

차세대 융합 교통 기술 분야중 하나인 Personal Rapid Transit 시스템 기술은 새로운 도심형 대중교통 기술로서 주목받고 있다. PRT 시스템은 센서 및 자율 주행 기술을 융합한 무인 운행 차량과 통신설비, 구간 검지 등 인프라 및 관련 요소 기술이 개발되어도 운행 예상 지역의 대규모 주행 트랙 구조에서 다수의 차량들의 다양한 주행 및 이상 패턴들에 대한 효율적이고 신뢰할 만한 관제 기술 개발이 요구된다. 또한 이러한 관제 기술 개발에 앞서 실제 PRT 차량 개발 및 소규모 테스트 트랙 구축을 통한 수많은 실차 주행과 같은 단계적 실험에 따른 막대한 시간 및 물리적 비용이 소요가 예상된다. 따라서 실제 구축 전 단계에서 다수의 PRT 차량에 대한 무선 기반 운행 관제 기술 개발을 위해서는 가상 환경에서의 시뮬레이션이 효과적이다. 본 논문에서는 물리엔진을 적용하여 단순 궤도 차량이 아닌 전문 조향 시스템을 탑재한 PRT 차량 모델을 대상으로 대규모의 운행 예상 지역의 지형, 궤도, 인프라 및 네트워크 특성과 구조를 반영한 시뮬레이션이 가능하도록 설계한 통합 시뮬레이터 기술을 제시한다.

**Key Words** : PRT, Vehicle Operational Control, Network Simulation, Physic Engine, VR Simulation

### ABSTRACT

Personal Rapid Transit(PRT), which is one of the next generation convergence transport technology, PRT system requires operation technology for controlling diverse vehicles and dealing with a variety of abnormal driving situations on a large scale trackway structures in expected operational area more efficiently and reliably. Before developing PRT control technology, it is essential that multiple testing procedures stepwise with building small scale test-tracks and develop real unmanned-vehicles. However, it is expected that the experiments demand huge amount of time and physical cost. Thus, simulation in virtual environment is efficient to develop wireless based control technology for multiple PRT vehicles prior to building real-test environment. In this paper, we propose a VR-based integrated simulator which physics engine is applied so that it enables simulation of front-wheel-steering PRT system rather than simple rail track system. The proposed simulator is also developed that it can reflect geographical features, infrastructures and network topology of expected driving region.

※ 본 연구는 철도연구원의 지원(수요응답형 순환교통 핵심기술 연구개발)으로 수행되었음 (지원기간 2012.3~11월)

◆ 주저자 : 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과, xclass@gmail.com, 정회원

o 교신저자 : 한양대학교 컴퓨터공학과, jjjung@hanyang.ac.kr, 종신회원

\* 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과, 유비쿼터스 통신 및 네트워킹 (UCN) 연구실, gathegold1@gmail.com, 준회원

\*\* 한국철도기술연구원, 신교통연구본부/수요응답형교통연구단, 교통 신기술 연구실, panflute00@naver.com, 정회원  
논문번호 : KICS2012-11-540, 접수일자 : 2012년 11월 16일, 최종논문접수일자 : 2013년 1월 18일

## I. 서 론

PRT는 자동 무인 주행 제어를 기반으로 전용 주행 궤도상에서 운용되는 자동화된 소형 대중교통 수단으로 알려진 Personal Rapid Transit의 약어이다. 현재까지 정의된 PRT 시스템의 기본적인 개념은 전기추진 기반의 친환경 소형 차량을 승객의 요구에 맞춰 출발지에서 목적지까지 중간 정차 없이 무정차(Non-Stop)로 차량 간 짧은 운전 시격을 유지하면서 운전자 없이 자동 운행하는 것을 특징으로 하는 개인화된 택시 개념의 교통 시스템이다.

이러한 PRT 시스템 기술은 택시/버스/열차등과 같은 기존 대중교통 수단 대비 저비용으로 24시간 동안 운용 가능한 장점을 제공함에 따라 이미 국외에서 친환경적으로 지속가능한 혁신적인 도심용 대중교통 시스템으로서 주목 받아왔으며 차량의 종방향 제어만 요구되는 레일 및 파이프 형태의 경량화된 궤도 방식을 기반으로 연구 및 개발되어 왔다<sup>[1]</sup>. 최근에는 차량 관련 신호, 센서, 통신 및 제어 기술들이 발전됨에 따라 별도의 레일이 없는 형태의 가이드웨이(주행로; 운행 트랙) 상에서 무인 자동주행이 가능한 무레일 방식의 PRT 기술이 도입되었다.

PRT 시스템의 대표적인 기술들로는, 1970년대 초 미국 West Virginia 대학에서 도심과 대학 캠퍼스를 연결하기 위한 Morgantown 시스템 건설을 시작으로 오하이오의 신시네티 Skyloop 프로젝트, Taxi 2000 사의 Skyweb Express 등이 있으며 영국은 ATS (Advanced Transportation System) 사의 ULtra (Urban Light Transit) 시스템, 독일의 Cabintaxi KK3, 국내는 포스코가 영국에 법인을 설립한 Vectus사가 2014년 개통 예정으로 순천만에서 진행 중인 PRT 기술이 있다.

이들 중 ULtra 시스템은 무레일 방식의 PRT 기술로 영국의 Heathrow 공항 터미널과 공항 주차장을 연계하기 위한 교통수단으로 선정되어 2011년부터 운용 중인 검증된 시스템이다. 이러한 무레일 방식의 경우 무인 차량 제어 기술을 기반으로 지정된 운행 트랙을 추종하며 주행하기 위해 차량의 전륜 조향 시스템에 대한 횡방향 제어 기술이 적용된다. 결과적으로, 운행 트랙을 기존 레일 기반의 PRT 시스템 대비 인도 및 육교 수준의 저비용으로 구축 가능하며 건물 내에도 건축물의 구조변화를 최소화하여 도입 가능한 장점을 제공한다<sup>[2]</sup>.

이러한 진보된 방식의 PRT 시스템은 철도 분야의 소형궤도 시스템 운영 기술을 기반으로 최근

‘Google Self-driving Car’의 등장을 시작으로 지능형 자동차 기술 개발 분야에서 활발히 연구되고 있는 무인 자동(자율) 주행 차량(Unmanned Ground Vehicle; UGV, Autonomous Vehicle; AV)의 지능형 주행 제어 기술과 VANET(Vehicular Ad hoc NETwork) 분야에서 “Connected Vehicle” 또는 “Networked Car”의 실현을 목표로 차량과 차량간 (Vehicle-to-Vehicle; V2V), 차량과 도로 인프라 (Vehicle-to-Infrastructure; V2I) 및 차량과 휴대용 무선 장치 (Vehicle-to-Nomadic; V2N) 등에 적용 가능한 모든 형태의 무선 통신 기술들을 활용하기 위한 V2X 통신 기술이 융합된 형태의 ITS 분야라고 볼 수 있다. 이중 특히, 인프라와 협력적으로 능동적 안전 주행 서비스를 제공하기 위해 연구되고 V2I 기반 능동안전 주행 기술과 연관성이 높다.

지능형 무인 주행 기술이 운전자가 목적지를 지정하면 현재 위치와 목적지까지 최적 경로를 생성하여 자율 주행에 필요한 교통 신호나 표지판과 같은 도로 정보, 교통흐름 및 위험상황을 인지하여 적절한 속도를 유지하거나 사고 예방에 능동적으로 대처하는 등의 모든 작업(Task)들을 단일 차량에서 수행 가능한 차량 자체 기술에 초점을 맞추고 있는 것에 반해 PRT 시스템은 지상 운행 관제 시스템 주도로 한정된 지역의 운행 트랙에서 지상에 설치된 운영 인프라 설비를 이용하여 다수의 무인 자동 주행 차량들을 단독 또는 그룹(Platoon) 주행 형태로 목적지까지 무정차로 유도하고 관제하는 자동 주행 제어 서비스 실현에 초점을 맞추고 있다.

따라서, PRT 시스템의 구성기술은 최근 ITS, VANET 분야의 무인자율 주행 및 V2I 기반 능동 안전 주행 기술 분야와 지향점이 같음에 따라 높은 기술적 연관성을 가진다<sup>[3]</sup>. 그러나, PRT 시스템은 국외에서 도입되어 검증된 기술로 전용으로 설계된 주행 트랙 및 인프라 설비 등의 주행 환경을 가짐에 따라 보다 빠르게 실현 가능한 자동운전 시스템 기술이다.

현재 PRT 시스템에서 기본적으로 정의하고 있는 특징인 탑승객의 원하는 시간에 목적지로의 주행과 같은 “On-Demand” 서비스와 무정차 주行的 두 가지 특징을 만족하기 위해서는 동적인 사용자 수요 패턴 변화에 대응 가능한 운행 관제 기술이 필수적으로 요구된다. 따라서, 관제 기술은 다수의 PRT 차량 내 제어 시스템들에 대한 실시간 차량별 데이터 추적을 기반으로 개별 주행 차량에 대한 효율적인 운행 경로 계산과 이를 통한 최적 경로 유도를

지속적으로 수행해야 하며 차량 이상, 사고 및 유지 보수에 따른 노선 우회, 주행 차량들 간의 충돌 위험 방지등과 같은 다양한 운영 상황에서 안전성을 확보하기 위한 다양한 실험과 기술 개발이 필요하다. 이러한 PRT 시스템 운영 관제 기술은 전체 시스템 기술 개발 단계에서 사실상 마지막 단계에 존재하며 운행 예상 지역의 대규모 트랙 환경에서의 현장 실험 (Field Operational Tests : FOTs)이 불가능하므로 개발에 많은 시간과 비용이 요구된다. 즉, 단계적으로 개발된 소수의 자율 주행 차량 제어 시스템과 V2I 기반 인프라 설비 및 운영 관제 시스템 모델을 개발하고 소규모 테스트 트랙을 구축한 뒤, 반복적 FOTs 수행 실시를 통한 평가, 보완 및 검증 단계가 필수적이다.

따라서, PRT 차량 개발 전 설계 단계에서 설계된 운행 트랙, 인프라 설비, 차량 주행 제어 모델, 관제 시스템 모델 및 이들 간의 통신 네트워크에 따른 특성들을 모두 수용하며 다양한 운행 상황 조건하에서 공간적 제약, 환경적 제약 및 위험도에 따라 현실적으로 수행하기 힘든 물리적 주행 실험들을 대체하여 시뮬레이션 함으로서 시간 및 비용 효과적으로 설계된 관제 기술을 분석, 평가 및 개발할 수 있는 가상 환경 기반의 통합 시뮬레이션 기술이 요구된다<sup>[4]</sup>.

본 논문에서는 인천 국제공항을 대상 운행 지역으로 선정하여 무레일 방식의 전문 조향 시스템을 탑재한 무인 주행 PRT 차량들을 대상으로 무선 기반 운영 관제 모델의 시뮬레이션을 수행하기 위해 개발된 가상현실 (Virtual Reality; VR) 기반 실시간 통합 시뮬레이터 기술을 제안한다. 먼저 PRT 시스템

기술 구성을 토대로 통합 시뮬레이터 구조의 다양한 구성 기술에 대한 단계별 구현 요구사항을 요약하고 현재 기술 단계에서 개발된 내용을 설명한다. PRT 운영 및 관제를 위해 설계된 차량 주행 제어기 모델, 관제 시스템 모델 및 이들의 운용 프로토콜들을 반영하여 실제 시스템처럼 동작하도록 구현한 Agent 시스템들에 대한 실시간 연동 시뮬레이션 방법과 보다 현실적인 가상 환경에서 시뮬레이션을 위해 통합된 물리 엔진 기반 VR 시뮬레이터, 차량 동역학 모델 및 조향 제어 알고리즘의 특징 설명에 초점을 맞춘다. 마지막으로, 실시간 네트워크 시뮬레이터 연동 기술을 통해 이들 간의 통합 실시간 시뮬레이션 수행에 따른 실험 결과를 제시하고 향후 활용 및 연구 방향을 기술한다.

## II. PRT 시스템 구성 기술 설계

### 2.1. PRT 시스템 구성 기술

무레일 방식의 PRT 시스템의 주요 특징으로 V2V 통신과 Global Positioning System (GPS) 기반의 측위를 통한 위치 기술 적용을 고려하지 않는다. 24시간 운용 개념과 대중교통으로서 안전성 확보를 위해 야간 및 악천후와 같은 여러 환경 변화에 민감하지 않은 마그네틱 기반의 마커(Marker)들을 주행 도로의 중앙부에 설치한 운행 트랙 환경에서 자동 주행하기 위한 기술을 적용한다. 이러한 방식의 자동 주행 제어 연구는 이미 1990년대에 일반 승용 차량을 대상으로 미국 캘리포니아의 PATH 프로그램으로 수행된 자동운전도로시스템 (Automated Highway Systems)이 대표적이다<sup>[5,6]</sup>. 이러한 PRT

표 1. PRT 시스템 관련 ITS 분야 및 V2X 통신 기술  
Table 1. PRT system related technologies to ITS and V2X communication

Classification	PRT System Technology	ITS and V2X Technology
PRT Operation Control System and Wireless-based Infrastructure Technology for Automated Vehicle Control	Control center system	ITS service center technology, V2I communication based automated vehicle guidance system <sup>[3]</sup> , driving behavior monitoring, optimized path calculation based on predictions
	Operational control, tracking and communications	IEEE 802.11 series based V2I communication
	Platooning control and unmanned vehicle driving control	V2I based vehicle position tracking and platooning control
PRT Vehicle Driving Control and Wireless Communication System	Driving control system	Forward radar-based adaptive cruise control, automatic driving control based on vision and magnetic marker sensors <sup>[5,6]</sup> (UGV, AV)
		In-Vehicle Network (IVN), IVN gateway platform for remote sensing, control and data communication <sup>[4]</sup>

시스템 특징들에 따른 관련 ITS 기술들의 요약은 표 1.과 같다.

2.2. 시뮬레이터 설계 및 구성 기술 개발

PRT 시스템 기술은 단계적으로 앞서 살펴본 다양한 ITS 및 교통 기술뿐만 아니라 차량 검지 및 추종 센서와 같은 인프라 설비의 기술들과의 융합을 요구한다. 이때, 실시간 시뮬레이션 환경 구축은 차량 제어부 모델 및 운행 관제부 모델 설계 단계에서부터 효과적으로 실험 평가를 통한 기술 개발과 반영을 위해 필수적으로 요구된다.

2.2.1. PRT 시스템 시뮬레이터 요구사항

PRT 시스템은 크게 무선 기반의 통신을 통해 다수의 PRT 차량들의 운동을 계획하고 모니터링하며 관제하기 위한 운행 관제부와 운행 지시를 받고 차량의 제어를 수행하는 차량 제어부로 구성된다. 운

행 관제부는 기본적으로 특정 PRT 차량의 주행에 대해 목적지까지의 최적경로를 계획하고 제어할 수 있어야하며 이후 통신과 운행 환경의 인프라 센서를 이용한 검지, 다수의 PRT 차량 운행 상황을 고려하여 무정차 조건을 만족하며 최적 관제하기 위한 운행 스케줄 계산 및 다양한 이상 상황 발생에 대처하기 위한 기술 개발이 요구된다. 개별 PRT 차량은 탑재된 차량 제어부를 통해 운행트랙 환경에 구축된 무선 통신 인프라 환경을 이용한 운행 관제 부와의 통신을 수행한다. 이러한 통신을 통해 운행 관제를 위한 주행 정보를 보고하거나 주행 제어 정보를 수신하며 자동 주행 시스템 제어에 직접 반영한다. 시뮬레이션을 위해서는 이러한 각 운행 관제 부와 차량 제어부의 기본적인 요구사항들에 따른 단계적 제어 모델 개발이 요구되며 최종 단계의 요구사항들은 표 2.와 같다.

표 2. PRT 시스템 시뮬레이터 요구사항  
Table 2. Requirements of PRT System Simulator

Classification	Items	Basic Requirements	Final Development Goals
PRT Operation Control Center System	Operational events, and operational condition definition	Normal control and simple abnormal situations (accidents, communication disruptions, non-stop detour routing)	Control in dynamic situations by the number of vehicles, destination change and complex driving abnormalities (vehicle derailment and power-train malfunction; engine, brakes, wheel and etc.)
	Network protocol design approach		Considering complex situation in multiple control and control according to calling and shuttle modes (for the specific number of vehicles)
	Design capacity	Up to four vehicles	Adaptive processing scheme per vehicle
	Operation control mode	Individual vehicle driving control	Platooning control
	Driving control mechanism	Driving information calculations for optimal scheduled-driving path and the detour route path	Individual PRT vehicle tracking and control for scheduled-driving path planning
	Agent system implementation	2D GUI-based track monitor continuously display the current operational status (entire event, individual vehicle tracking and control)	
PRT Vehicle Control System	Operational events, and operational condition definition	Analysis and design based on vehicle status data management in normal driving situation.	Vehicle status data management for complex abnormal driving situations
	Network protocol design approach	Vehicle driving status Monitoring	Extension through experimental results on real test vehicle data emulation
	Agent system implementation	Reflect object-oriented structure in vehicle status data management modeling	Synchronize the driving status with VR simulation's vehicle model, and extending the CAN data emulation function for use to real-vehicle's experimental data <sup>[7]</sup>

### 2.2.2. 차량 제어부 및 운행 관제부 모델 개발

통합 시뮬레이터를 구성하기 위한 첫 단계로 설계된 차량 제어부와 운행 관제부의 제어 모델들을 반영한 소프트웨어의 구현이 요구된다. 통합 시뮬레이션 구조 설계에 있어 실시간성이 요구되는 네트워크 기반의 제어 시스템 모델 및 기술들은 특정 시뮬레이션 도구의 기술에 종속되지 않는 시스템 단위로 교체가 가능하도록 독립된 시스템 구조로의 구현이 이상적이다. 시스템 단위의 분리 구조는 개별 시스템에 대한 네트워크 에뮬레이션 기반의 실시간 연동 시뮬레이션 적용이 비교적 간단하며 시스템 단위의 정확한 부하 및 성능 등의 분석이 가능함에 따라 프로토타입 수준의 제어 모델 개발이 가능하다. 따라서 최종 기술 개발 단계에서 개발 중인 시스템을 실제 시스템으로 교체하여 동일 조건 하에 시험 평가 및 성능 비교가 가능해진다.

본 논문에서 초점을 맞추고자 하는 것은 다양한 형태로 개발 가능한 이벤트-지향 모델(Event-Driven Model; EDM) 기반 PRT 시스템 제어 모델들을 설계한 뒤에 분석 평가하기 위한 실시간 통합 시뮬레이션 기술이다. 따라서 현재 PRT 시스템 시뮬레이션을 위해 적용된 제어 모델들의 복잡도와 상호동작의 관점에서 설명한다.

네트워크 기반 제어 모델들은 실제계에서 연속적으로 발생하는 물리적인 동적 특성들을 제어하기 위한 이산적인 로직들과 무선 통신 기술을 고려한 프로토콜 설계를 포함한다. 따라서, 잘 알려진 전통적인 상태 머신(State-Machine)을 기반으로 Hybrid 오토마타 모델로 설계된다<sup>8,9)</sup>. 현재, PRT 차량 제어부의 상태는 ‘승객탑승 대기’부터 ‘승객하차 완료’까지 총 15개의 상태로 구성되며, 운행 제어부의 상태는 ‘운행준비보고’부터 ‘운행완료’까지 총 11개의 상태를 가진다. 운행 제어부와 개별 차량 제어부들의 상태전이는 상호통신에 의한 이벤트들로 이루어지게 된다. 또한, 설계된 EDM 모델들은 다양한 상태와 이벤트에 관련된 알고리즘 및 로직을 추가로 적용함으로써 향후 여러 이상상황들에 대한 대처, 집단 운행지시를 위한 송수신 체계 등을 위한 기술들 및 최적화 연구 결과를 지속적으로 반영하여 확장하기 위한 객체지향 구조로 개별 Agent 시스템 상에 구현되었다. 설계된 네트워크 기반 제어 모델들을 시뮬레이션 도구 의존성 없이 실제 시스템 단위로 분리 구성함으로써, 연동 시뮬레이션 상황에서 각각의 제어 모델에 대한 대기 상태에서 이벤트에 의한 전이와 같은 동작들에 대한 처리 부하 및 지

연 시간등과 같은 성능분석 결과의 정확성이 높게 된다.

### 2.2.3. 무선 통신 프로토콜 설계 및 구현

기본적으로 운행 관제부와 차량 제어부간 통신의 관점에서 차량 추적을 위한 모니터링, 주행 지시 및 운행 제어를 통해 상호 동작하기 위한 무선 통신 프로토콜의 설계가 요구된다. 또한 통합 시뮬레이터 구조에서는 구성 요소 간 동기화된 시뮬레이션 수행이 중요함에 따라 필요 정보를 교환하기 위한 목적의 시뮬레이션 전용 프로토콜이 요구된다.

본 연구에서는 기본적인 행동을 위한 프로토콜 및 메시지들과 추가적으로 탑승객에 의한 목적지 입력, 최적 운행 경로를 위한 주행 지시, 이상 상황에 따른 운행 관제, 우회 경로 지시등의 이벤트들에 대응하기 위한 메시지 포맷을 포함한 무선 통신 프로토콜을 설계하였고, 다수 PRT 차량에 대한 신뢰적인 데이터 전송을 위해 최근 PRT 차량 통신 연구들에서 고려된 TCP 기반 프로토콜을 적용한다<sup>10,11)</sup>. 또한, 추가적으로 실시간 시뮬레이션 연동을 위한 시뮬레이션 프로토콜로서 VR 기반 시뮬레이터 시스템의 차량 모델의 주행 제어 및 상태 정보들을 PRT 차량 Agent 시스템과 연동하기 위한 프로토콜과 네트워크 시뮬레이터로 PRT 차량 Agent 주행에 따른 위치 정보를 실시간으로 동기화하기 위한 프로토콜을 사용한다.

### 2.2.4. PRT 시뮬레이션 트랙 구조

차량 Agent, 관제센터 Agent 및 VR 시뮬레이터에서 적용된 PRT 시스템의 트랙 구조는 다음 그림 1.과 같다. 그림의 화살표 방향과 같이 PRT 주행을 고려하여 일차선 단방향이며 정차역(Sation) 8개, 구간(Road) 수는 14개, 분기지점은 2개, 합류구간 2개로 구성된다. 모든 정차역은 대기 중인 PRT 차량을 위한 별도의 대기 노선이 존재하여 운행 중인 차량에 영향을 주지 않고 대기 차량은 운행시작과 함께 구간에 합류하게 되는 병합지점이다. 따라서 관제시 고려해야할 합류구간에 정차역이 포함되므로 사실상 총 10개의 병합지점으로 구성된다.

운행 관제부 Agent는 이러한 트랙 구조를 기반으로 Dijkstra 기반의 최적 경로 계산 알고리즘을 이용하여 최적 운행 경로(Scheduled Route)를 계산하여 개별 PRT 차량 Agent로 전송하게 되며 시뮬레이션 차량의 구간별 최대속도는 20~40km/h로 관제 시뮬레이션이 수행된다.

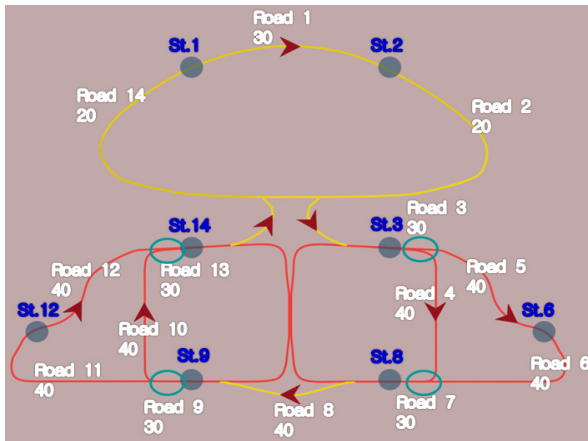


그림 1. PRT 시스템 트랙 구조  
Fig. 1. PRT System Track

자동 주행 PRT 시스템에서도 주행 차량에 대한 무선 관제를 시뮬레이션 해야 하며 향후 일반 차량과는 다른 시스템으로 구성되는 전기차의 시스템 특성들을 적용해야 한다. 따라서, 최종 시뮬레이션 단계에 요구되는 다양한 실험 조건들이 반영 가능한 VR 기반 차량 시뮬레이터 기술을 개발을 진행하였다. 또한, 가상 시뮬레이션 대상 공간에 구축되는 대규모 네트워크 인프라 설비의 토폴로지, 프로토콜 스택 및 전파 거리에 따른 감쇄와 같은 유/무선 통신 특성들의 실시간 반영을 위해 네트워크 에뮬레이션 방식을 통한 네트워크 전용 시뮬레이터와의 실시간 연동 시뮬레이션 기술을 적용하였다. 개발된 PRT 시스템 시뮬레이터에서 고려된 구성 기술 요소들과 다음 단계의 개발 목표들은 표 3.과 같다.

### Ⅲ. VR 기반 통합 시뮬레이터 개발

#### 3.1. 통합 시뮬레이터 요구사항 및 기술

다양한 운전 상황에 따른 주행 환경을 시뮬레이션 함으로서 시간 및 비용을 줄이기 위한 다양한 VR 기반 운전 시뮬레이터 기술들이 개발되어 왔다.

#### 3.2 통합 시뮬레이터 개발

##### 3.2.1. VR 시뮬레이터

최근, 대다수 3D 렌더링 엔진 기술들과 물리 엔진 기술들은 윈도우, 리눅스 및 OSX 및 스마트기기의 운영체제들로 이식이 가능한 Cross 플랫폼 환

표 3. PRT 시스템 통합 시뮬레이터 요구사항  
Table 3. Requirements of PRT System Integrated Simulator

Classification	Items	Basic Requirements	Final Development Goals
VR Simulator	Physics-engine based vehicle dynamics simulation	Engine based autonomous vehicle equipped with front-wheel steering system and CVT transmission	Reflect the actual operational characteristics of front/all wheel steering system equipped electric autonomous vehicle
	Unmanned vehicle simulation for integrated longitudinal and lateral directional control	Front-wheel-steering and acceleration controls for passing through waypoints with scheduled speed in the current driving route	Reflects the forward radar-based real-vehicle control design, specifications and characteristics
	3D vehicle model	Normal passenger vehicle model	Korean PRT model design reflection
	Track model (Guideway)	Virtual track design for parking area of incheon international airport	Korea railroad research institute's test track design structure
	Magnetic sensor location (Waypoints) data in track	Manually calculate location	Automatic location generation algorithm based on track data
	RFID sensing based vehicle detection in merge-and-exit points of the guideway structure	-	Reflect the actual communication characteristics of prototype sensor
	Terrain generation	Heightfield and texture mapping	GIS format support when required
Network Simulator	Simulation method	Virtual vehicle model integrated realtime simulation	Extension to emulation function for real PRT vehicle's CAN data
	Network topology	Wired-ethernet network between infrastructure and control center	-
	Wireless protocol stack	IEEE 802.11b applicability analysis	IEEE 802.11p applicability analysis



경을 지원한다. 3D 렌더링 엔진은 OpenGL, DirectX 등의 버전별로 다양하고 방대한 3D 그래픽 API 들에 대해 단일화된 API 접근성을 제공하도록 설계된 고수준의 Wrapper 클래스들, 각종 3D 그래픽 관련 알고리즘들 및 모델 포맷들에 대한 지원 기능들로 구성된 객체 지향적 설계 구조를 가진다. 따라서, 3D 기반 기술 구현에 따르는 시간과 비용 단축뿐만 아니라 개발된 기술을 다양한 환경의 이종 시스템들로의 이식을 가능하게 한다.

따라서, 3D 렌더링 엔진 기술로 개방형 엔진기술인 Irrlicht 3D 엔진을 사용하였다<sup>12,13</sup>. 대상 지역으로 인천 국제공항을 선정하여 공항 주차장 지형의 가로 및 세로 1km<sup>2</sup>에 해당하는 실제 공간 스케일로 주요 그래픽 객체들인 공항 건물들과 주행 트랙 구조 및 차량에 대한 3D 모델을 적용하였다. 구현된 가상 환경의 시뮬레이터 화면은 그림 2와 같다. 다음 단계로, PRT 차량이 지형, 트랙 등과 같은 구조에서 무선 관제에 따른 현실적인 실시간 차량 제어 시뮬레이션 수행이 요구됨에 따라 가상 환경에 존재하는 다양한 트랙 구조, 건축물, 장애물과 PRT 차량 동역학 모델의 상호 물리 작용들을 실시간으로 계산하기 위한 다중물리 엔진 기술 적용이 요구된다<sup>14</sup>.

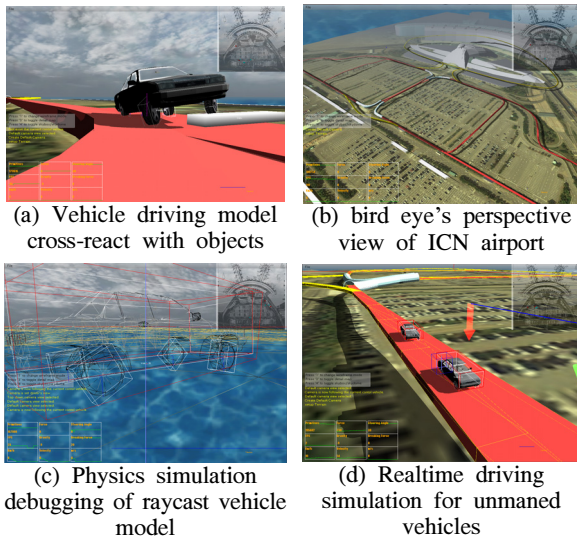


그림 2. 물리엔진 기반 3D 렌더링 엔진 기술 적용 실시간 차량 시뮬레이터  
Fig. 2. Vehicular simulator using physics engine based 3D rendering engine technology

### 3.2.2. 물리 엔진 기술 및 차량 동역학 모델

시뮬레이션 정확도에 초점을 맞춰 다양한 물리 연산들을 계층적으로 구성한 고수준의 동역학 모델

은 실시간 시뮬레이션 상황에서 차량 수의 증가에 따른 계산 부하가 커짐에 따라 적용이 불가능할 수 있다. 따라서, 실시간 다중 물리 기반 시뮬레이션에서는 계산량을 감소하기 위한 효과적인 계산 기법이 필요하다. 이러한 기술 중 하나로, 최근 다양한 게임 및 드라이빙 시뮬레이터 기술들에 적용되고 있는 Raycast 기법이 있다. 이 기법은 실시간 연산에 요구되는 계산 효율을 얻기 위해 차체에 적용되는 차량 휠 개수 및 그에 따른 서스펜션의 특성에 따른 직선들로 대체하여 계산하고 결과를 3D 렌더링 엔진의 차량모델을 통해 시각화하는 방식이다. 즉, 시뮬레이션 상황에 따라 지면과 마찰력, 충돌 객체, 휠의 속도, 차체와 서스펜션의 움직임과 같은 다중 물리력을 계산한 뒤, 발생한 결과를 렌더링 엔진에 구성된 차량 모델의 차체, 휠 및 서스펜션 등의 개별 3D 모델 요소들의 렌더링 정보에 반영하는 방식이다. 물론, 기술적으로 계산 속도와 정확도를 높이기 위해 다른 동역학 시뮬레이터와 같은 분리된 물리 계산 목적의 시스템이나 처리 프로세스의 연동 구성이 가능하다. 그러나 동기화가 정확히 보장되지 않으면 실시간 다중물리 계산 결과들이 적시에 3D 엔진으로 반영되지 못함으로 지터현상이 발생하며 연동 시뮬레이션 결과의 정확성이 보장되지 않는다. 따라서, 낮은 오버헤드를 가지는 고수준의 동기화 기술을 3D 엔진의 내부 렌더링 처리 구조에 직접 적용해야 하나 이러한 요구사항을 만족하는 설계와 기술 개발은 비용 대비 효과가 불확실하다. 현실적인 접근 방법은 멀티 코어나 멀티 GPU 구성 등을 가지는 고성능 단일 시스템 상에 3D 엔진과 물리엔진을 지연이 발생하지 않는 구조로 통합하고, 최적화된 물리 계산 모델의 적용 이후 복잡한 렌더링 및 다중물리 계산에 따른 처리 부하를 자체 시스템의 컴퓨팅 자원을 최대한 활용해 처리하기 위한 병렬 컴퓨팅 기술 활용이 효과적이다.

본 연구에서는 이러한 고려 사항에 적합한 개방형 물리엔진 기술 중 하나인 Bullet 물리엔진을 사용하였다<sup>15</sup>. 기술적인 특징으로 내부 물리계산 처리 구조에 GPU (Graphics Processing Unit)의 계산 능력을 활용한 병렬 처리를 가능하게 하는 CUDA (the NVIDIA Compute Unified Device Architecture) 기술을 지원한다<sup>16</sup>. 따라서, VR 시뮬레이터의 실시간 처리 성능 요구에 따른 기술적 대응이 가능하다.

현재 다수의 차량 및 향후 대규모 PRT 차량들에 대한 실시간 시뮬레이션 조건을 고려하여 앞서 소개한 Raycast 기반 차량 동역학 모델을 적용하여

개발되었다. 각각 가상 환경의 차량 모델은 그림 2.(a, c)와 같이 실시간으로 차체와 연결된 직선들을 기반으로 휠 속도, 각도, 마찰력 계산과 서스펜션의 위치 계산 등의 계산 모델을 수행하며 반영한다. 다중물리 계산 환경에서, Raycast 모델 기반의 차량 동역학 계산 모델 적용은 물리 계산량 감소뿐만 아니라 동역학 모델을 구성하고 있는 다양한 계산 모델의 요소들에 대한 직관적인 추가와 보완이 용이한 장점을 제공한다.

가상 환경의 시뮬레이션 중력 가속도는 -9.8 m/s, 가상 차량 모델은 1600 kg의 중량으로 전륜조향, 후륜구동 방식의 일반차량으로 설정하였다. 그림 2.(a)와 같이 3D 엔진에 구현된 가상차량 모델은 동역학 모델에 기반하여 현실점에서 차체에 가해지는 힘, 엔진, 브레이크, 조향각 및 차량의 휠과 충돌면의 마찰력 등과 같은 계산을 수행하여 실시간으로 트랙 상에서 차량 주행에 따른 임의의 장애물과의 물리적 상호작용이 가능하다. 동시에 차속, 개별 서스펜션 모델, 차량 전륜 조향각, 개별 타이어의 회전량 등의 발생 정보를 기반으로 자동주행 제어 알고리즘 개발과 시뮬레이션이 가능하게 된다. 다음 단계로, 시험 차량에 적용을 위해서는 데이터 모니터링 및 디버깅 기술의 개발<sup>17)</sup>과 함께 적용된 물리 계산 모델의 정확도를 높이는 것이 요구된다.

### 3.3. 실시간 연동 통합 시뮬레이션 구성

실시간 관제 시뮬레이션을 위해 앞서 설명된 구성 시스템들은 유선 이더넷으로 연결되는 구조로 그림 3.과 같이 운행 관제부를 포함하는 관제 센터 (Control Center) Agent 시스템, PRT 차량들의 차량 내 통신 플랫폼 역할을 수행하는 차량 제어부에 대한 Agent 시스템들, 가상환경에서 개별 PRT 차량 관제에 대한 자동 운전을 수행하여 그에 따른 다양한 주행 정보들을 실시간으로 계산하는 물리엔진 기반의 VR 시뮬레이터 시스템으로 구성된다.

VR 시뮬레이터상의 가상 PRT 차량 4대에 대한 각 차량 주행 정보들은 각각의 PRT 차량 제어부 Agent 시스템으로 동기화되어 운행 관제부 Agent 시스템과 상호 통신을 통한 실시간 시뮬레이션이 진행되는 방식이다.

이러한 구성에서, 차량 및 관제 Agent 시스템들 간의 유선 통신 패킷들에 대해 실시간으로 무선 통신 전파, 감쇄, 프로토콜 특성 및 통신 거리등에 따른 다양한 무선 통신 영향들을 반영하기 위해 실시간으로 개별 패킷을 계산하여 중계하기 위한 네트

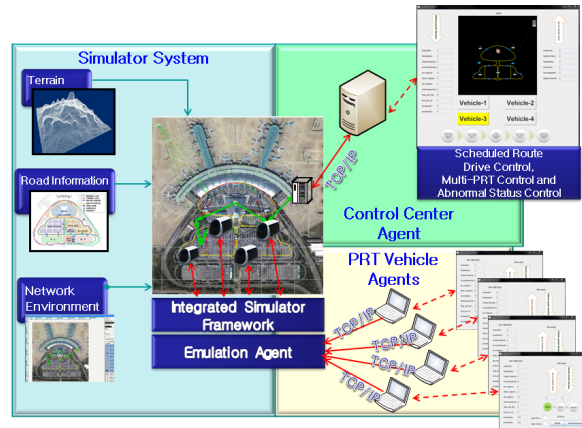


그림 3. 통합 PRT 시스템 시뮬레이터 구조  
Fig. 3. Architecture of Integrated PRT System Simulator

워크 에뮬레이션 시스템이 연동된다.

사용된 네트워크 에뮬레이션 방식은 QualNet 시뮬레이터의 IP 네트워크 에뮬레이션 기능을 이용한다. 차량 제어부 Agent와 운행 관제부 Agent 간 실제 연결된 유선 네트워크 상의 IP 통신 패킷들을 실시간으로 캡처하여 네트워크 시뮬레이터 상의 특정 무선 노드의 통신으로 맵핑한다. 다음 단계로, 네트워크 시뮬레이션 내에 설정된 무선통신 환경의 특성을 반영한 계산을 실시간으로 수행하며 결과에 따라 실제 유선 네트워크로 패킷을 인젝션한다.

네트워크 시뮬레이터는 VR 시뮬레이터 상의 가상공간에 반영한 실제 스케일과 동일한 면적의



그림 4. PRT 차량, 통신설비 및 통신환경 설정에 따른 실시간 네트워크 시뮬레이션 환경  
Fig. 4. Realtime network simulation environment composed of configured protocol stack, communication infrastructure and PRT vehicles

1km<sup>2</sup> 공간에서 그림 4.와 같이 통합 관제 센터와 Hub, Router, 노면 802.11b Access point (AP) 등으로 구성된 유선 인프라 구조로 설정된다.



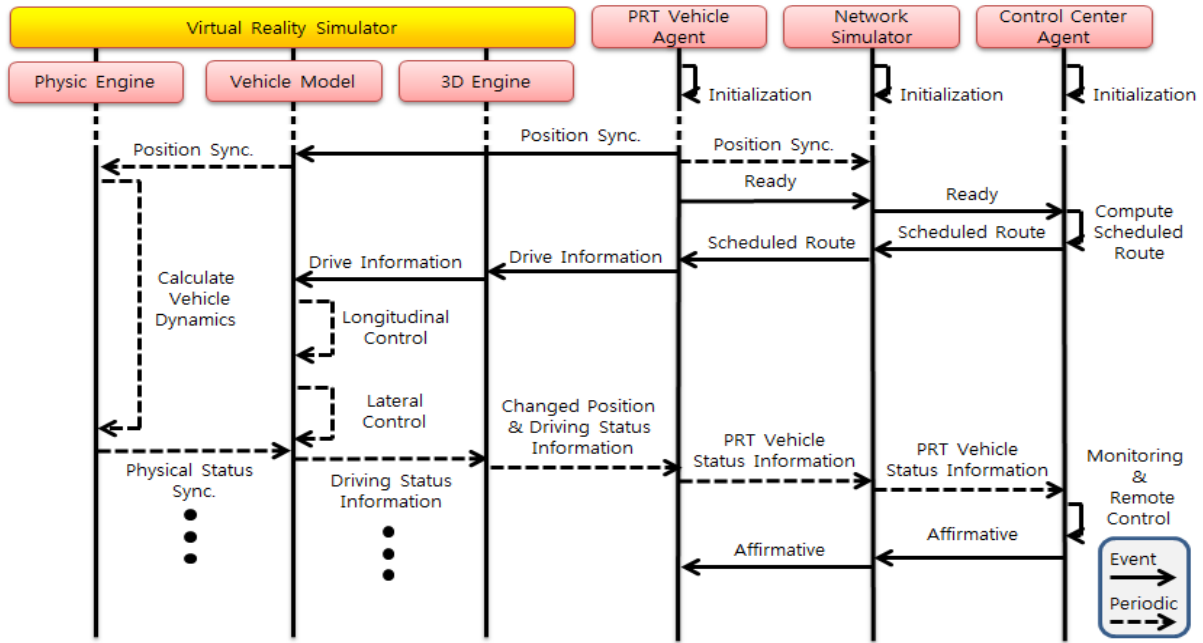


그림 5. 통합 시뮬레이터 연동 절차 Sequence Diagram  
 Fig. 5. Sequence diagram of real-time integrated simulation steps

### 3.4. 실시간 연동 통합 시뮬레이션 과정

PRT 시스템 시뮬레이션을 위한 실시간 연동 통합 시뮬레이션 과정의 주요 동작은 주기적인 동작과 비주기적인 이벤트 기반 동작으로 구분할 수 있으며 정상 주행 상황에서의 연동 과정은 그림 5와 같이 진행된다.

개별 시스템들의 초기화 이후, PRT 차량 제어부 Agent는 VR 시뮬레이터의 가상 환경에 차량 생성 위치 정보 (Position Sync.)를 주고 가상 환경의 차량의 상태를 주기적인 시뮬레이션 프로토콜 메시지인 ‘Driving Status Information’ 정보를 통해 동기화 한다.

동시에, 각 차량 Agent는 주기적인 시뮬레이션 연동 메시지를 통해 가상 환경의 PRT 차량 이동에 따른 네트워크 시뮬레이터 내의 무선 노드의 위치 정보 갱신 (Position Sync.)이 시작한다.

이후, PRT 무선 프로토콜 메시지로서 주기적인 차량 운행 모니터링과 관제를 위한 차량 운행 상태 보고 메시지인 ‘Vehicle Status Information’을 운행 관제부로 전송을 시작한다. 이 상태보고 메시지에는 현재 차량의 위치와 목적지 정보를 포함한 차속 등의 차량 상태 정보들이 포함되며 1초의 전송 주기를 가진다. 이후, 탑승객의 임의의 원하는 목적지를 선택하면 운행 관제부 Agent에게 운행준비 (Ready) 메시지와 목적지 정보가 전송된다.

운행 관제부 Agent는 이러한 운행준비 메시지를

수신 후 최적 운행 경로를 계산한다. 본 연구에서는 전체 주행 트랙에서 주행 중인 차량 상황을 고려한 Dijkstra 기반의 변형 알고리즘을 이용하여 계산된 운행 경로(Scheduled Route)를 운행 대기중인 PRT 차량 제어부 Agent로 전달한다.

PRT 차량 Agent는 운행경로 정보에 기반하여 가상환경 내의 차량 모델로 목표 경로 구간의 존재하는 차속 정보가 포함된 일련의 세부 통과 좌표들을 ‘Drive Information Message’를 통해 전송한다.

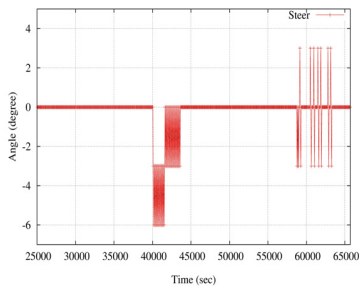
VR 시뮬레이터의 차량 모델에 존재하는 주행 제어 알고리즘은 입력 받은 좌표와 속도 정보들에 기반하여 실시간으로 종횡방향 제어를 수행하며 주행 하며 이때 발생하는 다양한 차량 정보들 중 관제에 필요한 현재 위치 및 속도 정보를 PRT 차량 제어부 Agent로 주기적으로 동기화한다.

이때, 운행 관제부 Agent는 1초 주기로 수신된 차량 운행 상태 보고 메시지에 대한 확인 응답 메시지 (Affirmative)를 6초 간격으로 보내며 운행 모니터링을 통해 상황에 따라 특정 차량의 가감속과 같은 종방향 제어 및 새로운 운행 계획을 전달한다.

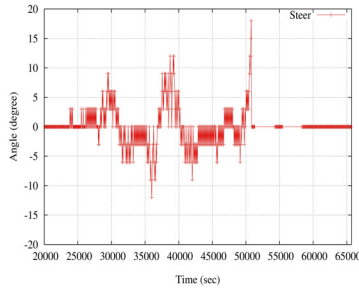
## IV. 실험

### 4.1. 가상 환경의 자동주행 차량 주행 실험

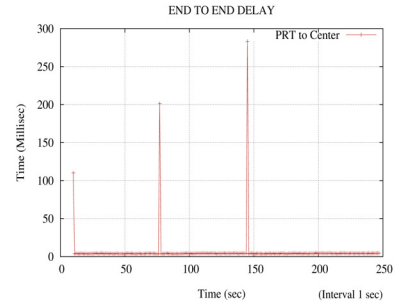
설계된 차량 모델의 자동주행은 운행 관제 시스템으로부터 목적지 Station 까지 최적 운행 경로로



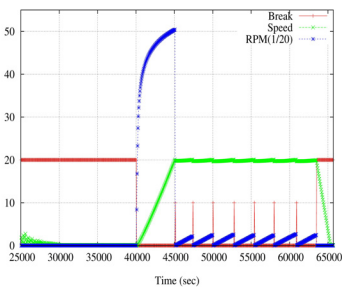
(a) 평면 지형 조건에서 조향 제어에 따른 각도 변화  
(a) Variations in degree caused by steering mechanism in flat-terrain



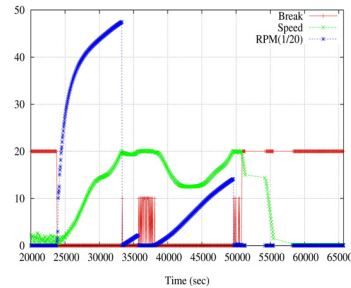
(b) 지형 고저 조건에서 조향 제어에 따른 각도 변화  
(b) Variations in degree caused by steering mechanism in height-terrain



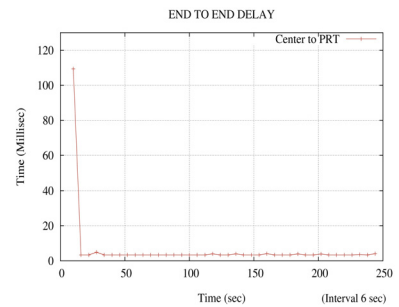
(c) PRT 차량에서 운행 관제 센터로 송신하는 메시지에 대한 종단간 지연  
(c) End-to-end delay from PRT vehicle to traffic center



(d) 평면 지형 조건에서 적용된 항속 알고리즘에 따른 차속 제어 결과  
(d) Result of vehicle velocity control applied cruise control algorithm in the flat-terrain environment



(e) 지형 고저 조건에서 적용된 항속 알고리즘에 따른 차속 제어 결과  
(e) Result of vehicle velocity control applied cruise control algorithm in the height-terrain environment



(f) 관제 센터에서 PRT 차량으로 송신하는 메시지에 대한 종단간 지연  
(f) End-to-end delay from traffic center to PRT vehicle

그림 7. 자동 운전 PRT 차량과 네트워크 시뮬레이션의 실시간 통합 시뮬레이션 결과  
Fig. 7. Real-time integrated simulation results of PRT autonomous vehicle and network simulation

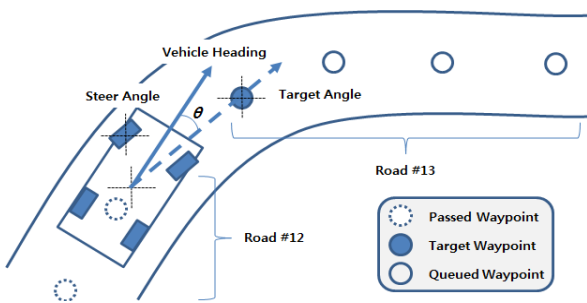


그림 6. 트랙 위치 데이터 기반 PRT 차량 횡방향 제어  
Fig. 6. Track waypoints data based lateral direction control of PRT vehicle

계산된 운행 계획 데이터를 수신으로 시작된다. 수신된 운행 데이터는 구간에 대한 경로와 통과 속도 정보만을 가지고 있다. 따라서, 실제 자동 주행 차량은 트랙 중앙에 설치된 마그네틱 노면 센서(마커)들에 대한 세부적인 노면 센서 좌표 정보에 해당하

는 트랙 위치 데이터를 탑재하고 이를 기반으로 주행 방향을 제어한다.

가상환경의 시뮬레이션 차량 모델에서도 원격에서 계산되어 전달된 운행 계획 데이터에 해당하는 구간에 존재하는 목표 센서들의 위치들을 설정한 트랙 위치 데이터를 기반으로 그림 6.과 같이 차량의 현재 방향각을 기준으로 목표 지점과 차량 간의 각도( $\theta$ ) 정보를 계산하여 실시간 중/횡방향 제어를 통한 자동 주행 수행이 요구된다.

따라서, 다음과 같이 실시간 관제 시뮬레이션을 만족하기 위한 수준의 중/횡방향 제어 알고리즘들을 개발하여 적용하였다.

- 1) 현재의 차량 방향각과 목표 지점과의 각도 정보를 기반으로 전륜 스티어링 제어
- 2) 목표 지점의 통과 속도를 준수하기 위한 엔진

RPM 가속 제어 및 목표 속도에서 감속 제어  
 횡방향 제어 알고리즘은 차량의 방향 벡터와 목표좌표까지의 벡터 계산을 통해 각도( $\theta$ )를 계산하고 현재의 전륜 스티어링 각도를 계산하여 최종 보정 각도를 산출하여 제어한다. 종방향 제어 알고리즘은 구간(Road) 목표 속도에 기반하여 계산된 트랙 위치(waypoint)별 목표 속도로 가속한다. 목표 속도 도달 시에는 감속하기 위한 RPM 및 브레이크 제어를 순차적으로 실행하는 방식으로 적용된 알고리즘들의 계산 복잡도는  $O(n)$ 이다.

제시된, 가상환경의 PRT 차량 실험은 지형 특성을 반영한 시뮬레이션이 가능함을 보여주기 위해 평탄 지형과 굴곡이 있는 두 가지 지형 조건에서 수행한 결과를 측정하였다. 이는 향후, 운행 지역의 지형적 특성을 반영하여 승차감을 고려한 관제 및 차량 제어 기술 개발을 위해 요구된다.

주행 실험은 목표 좌표들의 간격이 짧으면 해석이 어렵기 때문에 20km를 목표 속도를 가지는 단일 원거리 좌표를 입력하여 50m/s 시속으로 조향은 3도, 감속시 고정된 브레이크 값으로 제어를 수행도록 설정하였다. 실험결과는 각각 다음과 같다. 그림 7.(a), 7.(d)와 같은 평면 지형에서의 실험 결과를 통해 적용된 알고리즘의 기본적인 제어 특성을 확인 가능하다. 이후, 경사도가 존재하는 지형 조건에서 그림 7.(b), 7.(e)와 같이 지면과의 물리적인 마찰력에 의해 주행 차량의 감속을 보상하기 위한 제어 변화와 이에 따른 차속 변화등을 확인 가능하다.

#### 4.2. 주행 차량과 센터 간 네트워크 성능 분석

주행에 따른 무선 접속 지점 (Access Point; AP) 간 Handover 영향을 포함할 수 있는 구간에서의 주행 차량과 센터 간 실시간 네트워크 성능을 분석하기 위해 그림 8.과 같은 운행 구간을 대상으로 통합 시뮬레이션 상황에서의 통신 성능을 측정하였다.

실험은 IEEE 802.11b 무선랜 환경에서 애드 혹 라우팅 프로토콜 중 대표적인 On-Demand 프로토콜로서 전송이 요구될 시 경로 탐색 과정과 유지를 수행하는 AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector) 라우팅 프로토콜을 적용하였다<sup>18,19</sup>. 앞서 설명한 대로, PRT 차량의 제어부 모델은 운행 관제 부에게 1초 주기로 Status 정보를 송신하며 운행 관제 부 모델은 PRT 차량에게 6초 주기로 제어 메시지를 전송하게 된다. 그림 7.(c)는 PRT 차량에서 운행 관제부로 보낸 메시지들에 대한 종단간 지연을 측정된 결과로서 PRT 차량 이동에 따라 AP간

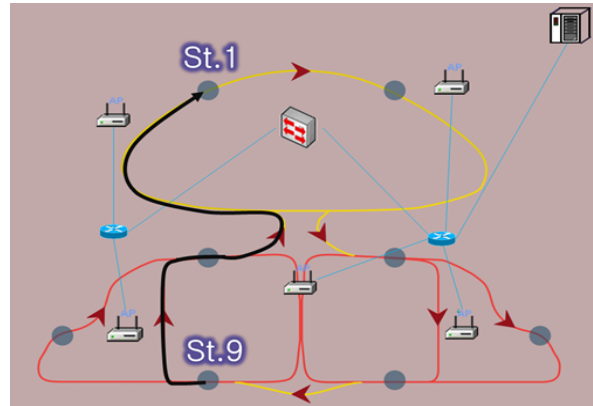


그림 8. 네트워크 성능 분석을 위한 PRT 차량 이동 경로  
 Fig. 8. PRT vehicle path for network performance evaluation

Handover 시점에서 네트워크 계층의 라우팅 지연 발생이 발생하며 이동에 따라 종단간 지연이 최소 110ms에서 최대 280ms까지 발생됨을 확인하였다.

또한, 그림 7.(f)는 운행 관제부에서 PRT 차량으로 전송한 메시지들에 대한 종단간 지연을 측정된 결과로서 실험 시작 초기 PRT 차량 위치에 따른 통신 탐색 시 네트워크 계층에서의 라우팅 발생 영향으로 인한 종단간 지연이 최대 110ms으로 측정된 결과를 확인 가능하다. 즉, 시뮬레이션에 적용된 운행 추적 및 관제용 프로토콜의 데이터 전송 특성이 기본적으로 낮기 때문이다. 따라서, 설계된 최대 4대 이상의 차량관제 상황에서도 변화하지 않는다.

## V. 결론

본 논문에서는 PRT 시스템 시뮬레이션의 요구사항을 단계적으로 분석 및 제시하였고 이를 만족하기 위해 개발된 두 가지 주요 엔진들에 기반한 VR 시뮬레이터와 네트워크 시뮬레이터로 구성된 실시간 PRT 시스템 통합 시뮬레이션 구조를 제시하였다.

또한, 개발된 시뮬레이션 기술로 실험적 차량 제어 모델들과 관제 모델 및 프로토콜을 연동한 실시간 통합 시뮬레이션 수행을 통해 다양한 실험 조건에서 PRT 시스템의 요소 기술에 대한 평가와 분석을 통한 기술개발이 가능함을 설명하였다.

그러나 적용 가능한 수준의 차량 제어 및 관제 알고리즘 개발을 위해서는 실차 수준의 실험 결과에 근접한 현실적이고 정확한 시뮬레이션 기술 개발이 요구된다. 따라서, 본 연구에서 논의된 VR 기반 통합 시뮬레이터 구성 기술 요소들에 대한 지속적인 보완뿐만 아니라 기능 및 알고리즘의 추가적

인 통합이 필요하다. 일반적으로 시물레이션 정확도는 계산량에 비례함에 따라 실시간성을 저해할 수 있는 구성 기술 요소는 적절한 정확도를 보장하며 계산량을 줄이기 위한 대체 알고리즘 적용 및 계산량 분담을 위한 시물레이션 처리 구조에 대한 고려가 동시에 요구된다.

제안된 통합 시물레이터 구조는 설계된 PRT 차량 제어부 및 관제 시스템의 운행 제어부 모델들과 함께 네트워크 프로토콜들이 구현된 Agent 구조로 구성되어 있다. 이는 유무선 네트워크로 연계되어 분산 처리되는 실제 PRT 시스템 구성 요소들과 동일하게 물리적으로 독립된 시스템 상에 구성됨으로써 계산량 분담을 통해 실시간 시물레이션을 수행 가능한 구조이다. 또한, 최종 기술 개발 단계의 정확한 시물레이션 기술은 대상 Agent를 실제 개발된 시스템으로 대체하여 테스트 및 검증 가능한 에뮬레이션 목적으로 활용할 수 있다.

향후 실제 구축될 소규모의 PRT 테스트 트랙에서 개발된 소수의 실제 PRT 시험 차량들을 다수의 가상 시물레이션 PRT 차량들과 함께 개발된 관제 및 운행 기술을 적용한 시물레이션을 통한 기술개발을 목표로하여 언급된 시물레이션의 정확도를 높이기 위한 방안중 하나인 PRT 실차 데이터 에뮬레이션 기능 연구를 계획하고 있다. 현재 설계 수준의 제어 모델 입출력을 반영하기 위해 구현된 차량 제어부 Agent 모델의 데이터 포맷 및 입출력 인터페이스에 대한 실차 데이터 기반 에뮬레이션 기능 확장을 통해 물리적인 주행 실험 결과들에 기반하여 현재 적용되어 있는 차량 동역학 모델의 보완이 가능할 것으로 예상된다. 즉, 향후 실제 개발 차량의 탑재될 제어 시스템에서 발생하는 저수준의 차량 센서 및 제어 데이터 포맷으로 입출력이 가능하게 확장함으로써 개발된 시험 차량의 동일한 제어 데이터에 대해 실제 주행 실험과 시물레이션 결과에 대한 분석을 기반으로 실시간 운행 관제 및 차량 제어에 요구되는 수준의 정확도를 제공하는 시물레이터 기술로 발전 할 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 제안된 기술을 통해 다양한 운행 상황 및 관제 조건에서의 네트워크 성능 분석이 가능함에 따라 향후 대규모의 PRT 차량의 운행 관제시 안전성이 보장되기 위한 전용 네트워크 프로토콜 설계, 네트워크 한계 용량 연구, 주행 차량 내/외부 화상 모니터링 데이터 연계에 따른 네트워크 부하 분석 연구 등이 가능할 것이다.

## References

- [1] Ollie Mikosza, Wayne D. Cottrell, "MISTER and other New Generation Personal Rapid Transit Technology," *Transportation Research Board*, 2007.
- [2] Martin Lowson, "New Approach to Effective and Sustainable Urban Transport," *Transportation Research Board*, vol. 1838/2003, pp. 42-49, Jan. 2003.
- [3] Gunwoo Kim, Song-nan Bai, Pyungsun Park, Joonghyun Moon, Jaeil Jung, "A structured TDMA-based V2I MAC protocol for automated guided vehicle control systems," *Information Networking (ICOIN)*, 2012 International Conference on, pp. 154-158, Bali, Indonesia, 2012.
- [4] Pyungsun Park, Hongbin Yim, Heeseok Moon, Jaeil Jung, "An OSGi Based In-vehicle Gateway Platform Architecture for Improved Sensor Extensibility and Interoperability," *Computer Software and Applications Conference*, 2009. COMPSAC '09. 33rd Annual IEEE International, pp. 140-147, Seattle, WA, July, 2009.
- [5] Han-Shue Tan, Guldner, J., Patwardhan, S., Chieh Chen and Baugler, B, "Development of an automated steering vehicle based on roadway magnets-a case study of mechatronic system design," *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol. 4, no. 3, pp. 258-272, Sep, 1999.
- [6] Young-Yoon Jung, Dae-Young Lim, Young-Jae Ryoo, Young-Hak Chang, Jin Lee, "Position Sensing System for Magnet Based Autonomous Vehicle and Robot Using 1-Dimensional Magnetic Field Sensor Array," *SICE-ICASE*, 2006. International Joint Conference, pp. 187-192, Busan, Korea, Oct, 2006.
- [7] Pyungsun Park, Myonggu Park, Gunwoo Kim, Sangbock Park, Jangyoung Lee, Jaeil Jung, "Development of The ISO 15765-based Integrated On-Board Diagnostics Protocol Conversion Algorithm with



- System,” *KSAE Conference*, vol. 11, pp. 1428-1433, May, 2011.
- [8] Alur, R., “Formal verification of hybrid systems,” *Embedded Software(EMSOFT)*, 2011 Proceedings of the International Conference on, pp. 273-278, Taipei, Oct, 2011.
- [9] Jianhui Mao, Liqian Chen, “Runtime Monitoring for Cyber-physical Systems: A Case Study of Cooperative Adaptive Cruise Control,” *Intelligent System Design and Engineering Application (ISDEA)*, 2012 Second International Conference on, pp. 509-515, Sanya, Hainan, Jan, 2012.
- [10] Junho Lee, Jaeho Lee, Younkyu Kim, “A Computer Simulator to Assess the Operational Scenarios for the Personal Rapid Transit Systems,” *IJR International Journal of Railway*, vol. 1, no. 3, pp. 117-121, Sep, 2008.
- [11] Paul Hoffman, “Personal Rapid Transit”, *Transportation Research Board*, Jan, 2007.
- [12] <http://irrlight.sourceforge.net/docu/index.html>
- [13] Zhigang Xie, Ming Xu, Zhenxiang Cai, Ningbo Qiao, “The design and implementation of three-dimensional virtual experiment system based on graphics engine,” *Education Technology and Computer(ICETC)*, 2010 2nd International Conference on, vol. 4, pp. 477-480, Shanghai, June, 2010.
- [14] Lamotte, O., Galland, S., Contet, J.-M., Gechter, F., “Submicroscopic and Physics Simulation of Autonomous and Intelligent Vehicles in Virtual Reality,” *Advances in System Simulation(SIMUL)*, 2010 Second International Conference on, pp. 28-33, Nice, Aug, 2010.
- [15] <http://bulletphysics.org/wordpress/>
- [16] de Farias, Almeida, Teixeira, Teichrieb, V, Kelner, J., “A High Performance Massively Parallel Approach for Real Time Deformable Body Physics Simulation,” *Computer Architecture and High Performance Computing*, 2008. *SBAC-PAD '08*. 20th International Symposium on, pp. 45-52, Campo Grande, MS, Oct, 2008.
- [17] Feng Luo, Chu Liu, Zechang Sun, “Intelligent Vehicle Simulation and Debugging Environment Based on Physics Engine,” *Informatics in Control, Automation and Robotics, 2009. CAR '09*. International Asia Conference on, pp. 329-333, Bangkok, Thailand, Feb, 2009.
- [18] C. Perkins and E. Royer, “Ad-hoc on-demand distance vector routing,” *Mobile Computer Systems and Applications, 1999, Proceedings, WMCSA '99*, Second IEEE Workshop on, pp. 90-100, New Orleans, LA, Feb, 1999.
- [19] C. Perkins, E. Belding-Royer, S. Das, “Ad hoc On- Demand Distance Vector (AODV) Routing”, *RFC 3561*, 2003, from <http://tools.ietf.org/html/rfc3561>.

**박 평 선 (Pyung-sun Park)**



2003년 8월 명지대학교 정보통신공학 및 컴퓨터공학과 졸업

2003년 8월~2004년 12월 한컴메시징 솔루션 엔지니어

2005년 1월~현재 한양대학교 전자통신컴퓨터공학과 박사과정

<관심분야> ITS Middleware, In-Vehicle 네트워크, 차량간 통신, 시뮬레이션

**김 현 명 (Hyun-myung Kim)**



2012년 2월 경기대학교 컴퓨터과학과 졸업

2013년 1월~현재 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 석사과정

<관심분야> 차량 네트워크, 인터넷, 차세대 네트워크

옥민환 (Min-hwan Ok)



1998년 2월 부산대학교 전자  
계산학과 석사

2009년 2월 고려대학교 컴퓨  
터학과 박사

2004년~현재 철도기술연구원  
선임연구원

<관심분야> Internet of Things,

Ambient Data Integration, Sensor-Actuator  
Network

정재일 (Jae-il Jung)



1981년 2월 한양대학교 전자  
공학과 졸업

1984년 2월 한국과학기술원 전  
기 및 전자공학과 공학석사

1993년 6월 프랑스 국립전기  
통신대학(ENST) 컴퓨터네트  
워크공학과 공학박사

1983년 3월~1997년 2월 한국통신 통신망연구소

1993년 1월~1993년 6월 CNET Lannion(프랑스 국  
립 전기통신 연구소) 연구원

1997년 3월~현재 한양대학교 컴퓨터공학부 교수

<관심분야> 차세대 네트워크, 인터넷 QoS, ITS/텔  
레매틱스, 보안, 차량 네트워크