

교통소통정보 고려 모빌리티 기반 수요응답형 자율배송 서비스 전역경로 생성 시스템 개발

A Study of Global Path Planning System for Traffic Information Aware On-demand Delivery Services Using Autonomous Mobilities

박 채 훈* · 전 상 윤**

* 주저자 : 한국자동차연구원 자율주행기술연구소 연구원

** 교신저자 : 한국자동차연구원 자율주행기술연구소 선임연구원

Chaehun Park* · Sang-Yun Jeon*

* Automatic Driving Technology Research Division, KATECH

† Corresponding author : Sang-Yun Jeon, jeonsyun23@gmail.com

Vol. 23 No.5(2024)

October, 2024

pp.168~185

pISSN 1738-0774

eISSN 2384-1729

<https://doi.org/10.12815/kits.2024.23.5.168>

2024.23.5.168

Received 19 August 2024

Revised 27 August 2024

Accepted 2 October 2024

© 2024, The Korean Society of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요 약

자율주행 기술은 기초적인 연구 단계를 넘어 상용화 초입 단계에 접어들었으며, 최근에는 자율주행 기술과 정보통신 기술 기반 지능형교통시스템을 접목한 모빌리티 서비스들이 활발히 개발되고 있다. 본 연구는 모빌리티 기반 서비스 중 하나인 수요응답형 자율배송 서비스의 운영 효율성 향상을 위해 다중 모빌리티 전역경로를 생성하는 것으로, 지능형교통시스템을 통해 수집한 교통소통정보와 서비스 사용자 수요를 고려하여 최단 시간 내에 자율배송을 완료할 수 있는 혼합 정수 최적화 기반 전역경로 생성 시스템이 개발되었다. 개발된 전역경로 생성 시스템은 교통소통정보 갱신 또는 서비스 사용자의 추가 수요 발생에 따라 전역경로를 갱신하며 상암 자율주행 테스트베드의 교통소통정보를 활용하여 수요응답형 자율배송 서비스 운영이 가능성이 확인되었다. 또한, 기존 유인 배송 서비스와 비교분석을 통해 운영 비용 절감과 물품 배송 및 공차 시간이 단축이 확인되었다.

핵심어 : 자율배송 서비스, 수요응답형 서비스, 차량 경로 생성 문제, 혼합 정수 최적화

ABSTRACT

Autonomous driving technologies have entered the initial stage of commercialization. Recently, mobility services that combine autonomous driving technologies and information and communication technologies based intelligent transportation systems are being actively developed. This study develops a global path planning system that considers traffic information and user demands to generate the shortest time paths for autonomous delivery services using Mixed Integer Programming. While providing the autonomous delivery services, the generated paths are updated recursively according to traffic information updates or additional demands. The developed global path planning system was verified by simulations with traffic information in the Sangam autonomous driving test-bed, and comparative analysis with existing manned delivery services shows that operating costs, product delivery time, and empty driving time were reduced.

Key words : Autonomous Delivery Service, On-demand Service, Vehicle Path Generation Problem, Mixed Integer Programming

I. 서 론

다중 모빌리티 서비스는 미리 정해진 고정 노선을 따라 이동하는 순환형 서비스(서울특별시 심야 자율주행 버스 운행 서비스¹⁾)와 사용자의 요구조건에 따라 유동적으로 노선을 변경하는 수요응답형 서비스(Ho et al., 2018)로 분류될 수 있고 순환형과 수요응답형 모빌리티 서비스의 대표적인 예시들로는 각각 순환버스와 콜택시가 있다. 최근에는 다중 모빌리티의 운영 효율 극대화를 위해 공차 및 이동 시간 최소화가 가능한 수요응답형 모빌리티 서비스가 주목받고 있으며, 각 서비스에 적합한 VRP(Vehicle Routing Problem) 모델링 및 솔루션 도출을 위한 다양한 기법들(Helsgaun, 2000; Helsgaun, 2009; Kim et al., 2020; Kim and Cho, 2023; Janinhoff et al., 2024; Nazari et al., 2018; Psaraftis, 1980; Zong et al., 2024)이 연구되고 있다.

VRP 솔루션 도출은 목표 서비스 제공을 위해 고안된 제약조건들을 만족하면서 비용 함수(예. 전체 이동거리 또는 시간)를 최소화하는 다중 모빌리티 전역경로를 생성하는 것으로 휴리스틱(Helsgaun, 2000; Helsgaun, 2009; Kim et al., 2020), 최적화(Kim and Cho, 2023; Psaraftis, 1980), 머신러닝(Nazari et al., 2018; Zong et al., 2024) 등을 활용한 다양한 기법들이 학계에 보고되고 있다. 휴리스틱 기법 중 가장 널리 알려진 것은 LKH(Lin-Kernighan- Helsgaun)(Helsgaun, 2000; Helsgaun, 2009)이며 다음의 과정을 통해 지역 최적인 전역경로를 생성한다. 1) 최적여부에 관계 없는 임의의 전역경로를 생성한다. 2) 임의의 노드(예. 출발지, 도착지, 상하차지) k 개를 선택한다. 3) 선택된 노드들의 연결 경로를 변경하여 제약조건들을 모두 만족시키며 비용을 최소화하는 새로운 연결 경로를 찾는다. 4) 새로운 연결 경로를 이용하여 전역경로를 변경한다. LKH는 선택하는 노드들의 개수에 따라 k -Opt 알고리즘으로 분류(Helsgaun, 2009)되며 일반적으로 2-Opt 또는 3-Opt가 사용된다. 휴리스틱 기반 기법들은 계산시간이 노드 수의 증가에 따라 지수함수적으로 증가하는 VRP를 빠르게 해결할 수 있다는 장점을 가지지만 복잡한 제약조건을 가지는 서비스를 모델링하기에 부적합하고 최적성이 상대적으로 떨어진다는 단점을 가진다. 최적화 기반 기법들(Kim and Cho, 2023; Psaraftis, 1980)은 비용 함수 및 제약조건들을 수학적으로 모델링하고 모델링 된 문제를 혼합 정수 최적화(Mixed Integer Programming)(Kim and Cho, 2023) 또는 동적 계획법(Dynamic Programming)(Psaraftis, 1980) 등의 최적화 기법을 이용하여 해결하는 과정을 거친다. 최적화 기반 기법들은 다양한 서비스 구현이 용이하다는 장점이 있지만 복잡도에 따라 연산시간 또는 필요 메모리가 증가한다는 단점을 가진다. 최근에는 강화학습 알고리즘들이 고도화됨에 따라 다양한 머신러닝 기반 기법들(Nazari et al., 2018; Zong et al., 2024)이 제시되고 있으나, 제약조건 만족여부를 보장할 수 없고 학습에 수많은 데이터 및 시간이 소요되며 양질의 데이터 확보가 필요하다는 어려움이 있다.

최근 혼합 정수 최적화 솔버들(CPLEX²⁾, GUROBI³⁾, OR-Tools⁴⁾, SCIP⁵⁾)의 기능 및 안전성 향상과 더불어 VRPTW(Vehicle Routing Problem with Time Windows)(Alvarenga et al., 2007), PDVRP(Pick-up and Delivery Vehicle Routing Problem)(Toth and Vigo, 2014), CVRP(Capacitated Vehicle Routing Problem)(Laporte, 2009)와 같은 다양한 VRP들이 전역경로 생성을 위해 주목받고 있고, 이를 위한 다양한 솔루션 도출 기법들이 학계에 보고되고 있다. 수요응답형 자율배송 서비스 제공을 위해서는 VRPTW에서 같이 서비스 제공 시간에 대한 제약조건이 고려되어야 하고 PDVRP에서와 같이 노드의 타입별 특성(예. 하차지 방문 이전 상차지 방문 필

1) <https://english.seoul.go.kr/worlds-first-late-night-autonomous-bus-service>

2) <https://www.ibm.com/kr-ko/products/ilog-cplex-optimization-studio>

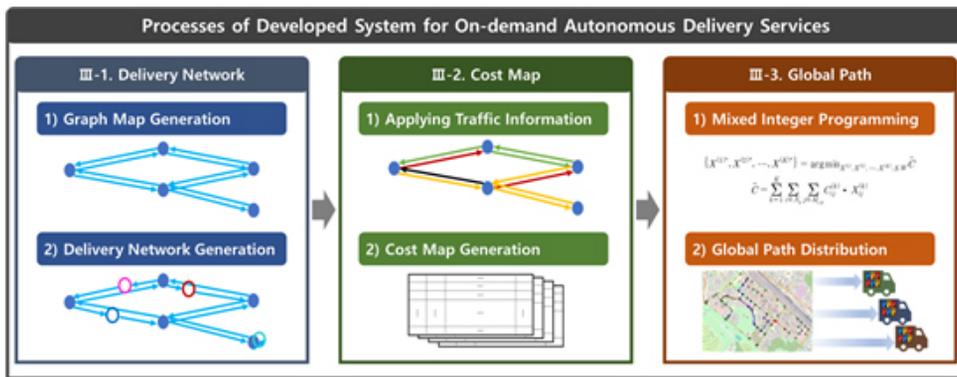
3) <https://www.gurobi.com>

4) <https://developers.google.com/optimization?hl=ko>

5) <https://www.scipopt.org>

수)이 고려되어야 한다. 또한, CVRP에서처럼 적재 가능한 물품의 총 무게 또는 수량이 고려되어야 한다. 이와 더불어 현실적인 서비스 제공 전역경로 생성을 위해 기존 연구들에서는 거의 다루지 않았던 공공도로 교차로 위치 및 링크(교차로 간 연결성) 관련 정보가 고려되어야 한다(Kim and Cho, 2023). 교차로는 기존 VRP에서 다른 일반적인 노드들(예. 고객, 상하차지)과 다르게 반드시 거쳐가야 한다는 제약이 없지만 진입하면 반드시 진출해야 한다는 제약을 가진다. 또한, 기존 연구들은 대부분 가상 또는 해외 데이터를 기반으로 검증(Kim and Cho, 2023)되어 국내 환경에서 모빌리티 기반 자율배송 서비스 제공 가능성에 대한 분석 결과가 부족한 실정이다.

본 연구에서는 시간에 따라 변화하는 교통소통정보와 사용자의 수요를 고려한 수요응답형 자율배송 서비스 제공을 위한 혼합 정수 최적화 기반 전역경로 생성 시스템이 개발되었다. 개발된 전역경로 생성 시스템은 ITS국가교통정보센터로부터 주기적으로 교통소통정보를 수집하고 이 정보를 VRP 비용 함수 생성에 활용함으로써 이동이 보다 원활한 도로를 선택하여 자율배송이 이루어지도록 설계되었다. 또한, 실시간으로 수집되는 사용자의 배송요청을 VRP 비용 함수 및 제약조건 생성에 활용하여 수요응답형 서비스가 가능하도록 개발되었다. <Fig. 1>은 개발된 경로 생성 시스템이 경로를 생성하기까지의 과정을 개략적으로 보여주며, 각 과정에 관한 자세한 내용은 3장에 기술했다.



<Fig. 1> A brief summary of path generation processes for autonomous delivery mobilities

논문은 다음과 같이 구성되었다. 2장에서는 본 연구에서 다루는 수요응답형 자율배송 서비스의 정의 및 기대효과를 제공하고 각 자율배송 시스템 구성요소를 설명한다. 3장에서는 교통소통정보 및 사용자 수요 고려 수요응답형 자율배송 서비스를 위한 혼합 정수 최적화 기반 전역경로 생성 시스템을 설명하고, 4장은 상암 자율주행 테스트베드의 실교통소통정보를 활용한 시뮬레이션 검증 결과를 제공한다. 마지막으로 5장은 본 연구에서 도출된 결론을 제시한다.

II. 수요응답형 자율배송 서비스

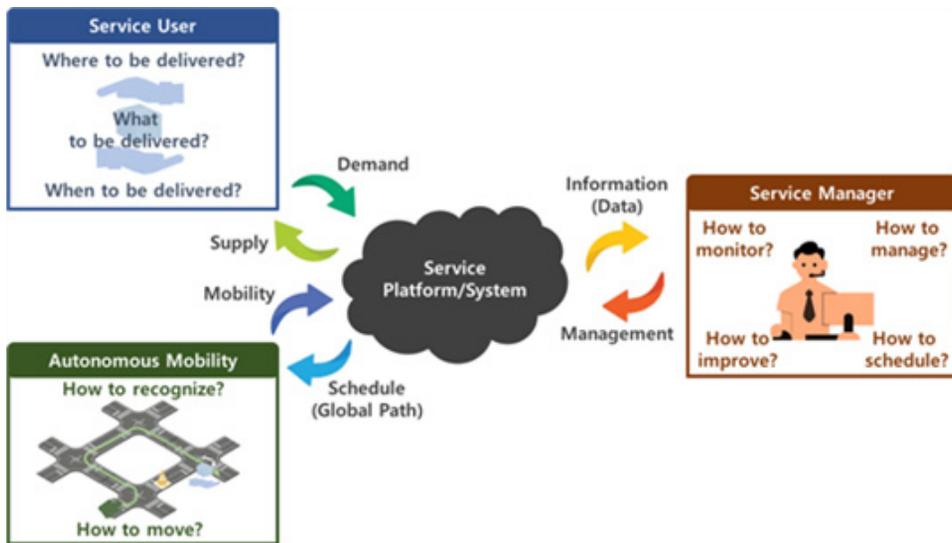
이 장에서는 본 연구에서 다룬 수요응답형 자율배송 서비스를 정의하고 기대효과를 설명한다. 또한, 서비스 제공을 위해 필요한 전체 시스템의 구성요소들을 각각 소개하며 그 역할을 설명한다.

6) <https://its.go.kr>

1. 서비스 정의 및 기대효과

자율주행 기반 수요응답형 서비스(Mokhtarian et al., 2021; Oh et al., 2020)는 <Fig. 2>과 같이 서비스 사용자의 수요와 모빌리티 자율주행을 통한 공급 그리고 서비스 운영자의 공급 관리를 통해 이루어진다. 수요응답형 서비스의 일종인 수요응답형 자율배송 서비스를 위해서는 정보 교류 및 유기적 상호작용이 필수적이며, 서비스 사용자는 사용자 어플리케이션이나 웹 기반 인터페이스 등을 활용하여 배송 물품의 상차지와 하차지 및 서비스 제공 시간대를 설정한다. 모빌리티 기반 자율배송은 서비스 사용자가 신청한 서비스 제공 시간대에 맞추어 물품을 인계 및 수송하는 서비스를 수행하는 것으로 무인 모빌리티를 활용하기 때문에 공도 등에서 발생할 수 있는 다양한 이벤트들에 대한 적절한 대처가 필수적으로 요구된다. 이를 위해 서비스 운영자는 관제시스템을 운영하고 관제시스템은 모빌리티 또는 지능형교통시스템으로부터 주어진 정보들을 융합하여 전역경로를 수정하는 등의 임무를 수행함으로써 서비스 품질을 관리한다.

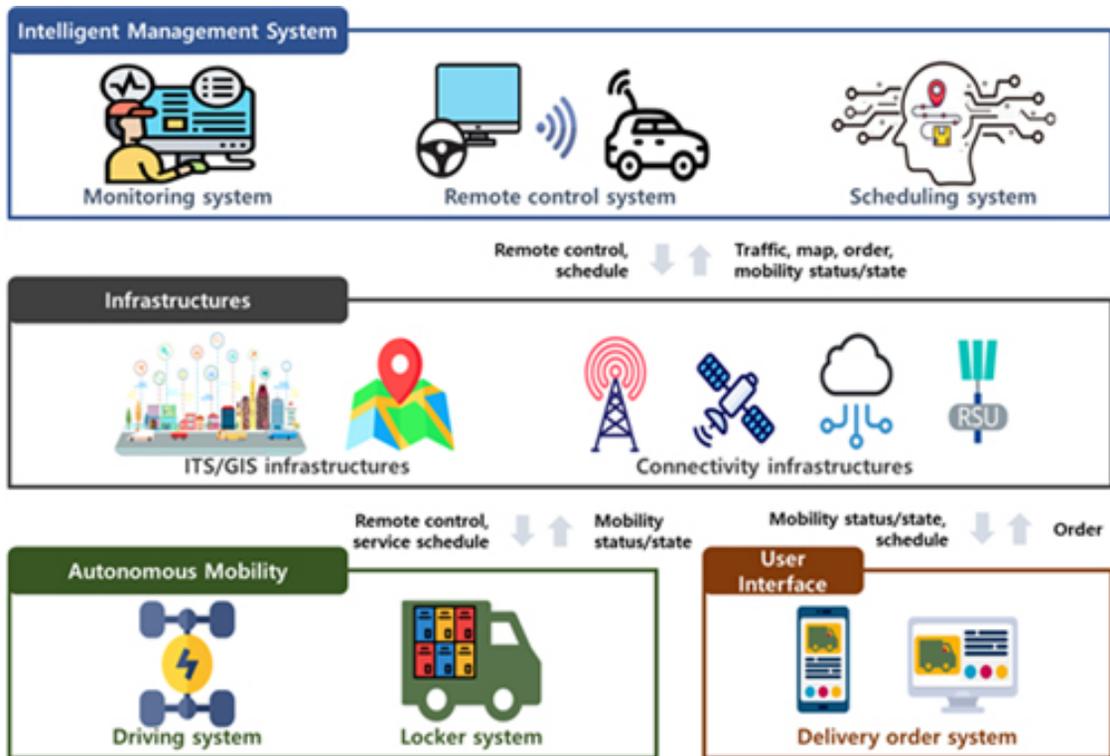
포스트 코로나 시대에 접어들면서 음식, 식료품 배달 등의 언택트 서비스 시장은 급격한 성장을 이루고 있고 세계적인 인구 감소와 인건비 상승 그리고 인플레이션 추세가 이와 맞물리면서 <Fig. 3>에서와 같이 국내외 다양한 업체들이 자율주행을 활용한 배송 서비스를 연구하고 있다. 수요응답형 자율배송 서비스는 거동이 불편한 취약 계층을 비롯하여 특정한 시간대에만 물품 수령이 가능한 맞벌이 부부 등에게 일상적인 편의성을 제공할 것으로 기대된다. 또한, 향후에는 도보를 주행하는 라스트마일 모빌리티들과의 연계를 통해 점포에서 배송지까지의 물류 전과정 자동화를 비롯하여 무인 순찰/경비 등의 역할도 수행할 수 있을 것으로 기대된다. 추가로 다수의 자율주행 모빌리티를 유기적으로 변동하는 경로를 따라 운영함으로써 고정적인 노선을 주행하며 발생하는 공차 운행 등을 방지하여 서비스 운영자에게도 도움이 될 수 있다.



<Fig. 2> An architecture of on-demand autonomous delivery service



<Fig. 3> Examples of delivery services using autonomous mobilities



<Fig. 4> A information flows diagram of the developed autonomous delivery system

2. 자율배송 시스템 구성 및 역할

본 연구에서 개발된 자율배송 시스템의 구성요소는 지능형 관제시스템과 적재함 탑재 자율주행 모빌리티 그리고 지능형교통시스템과 지리정보시스템 등의 정보 제공 및 송수신 인프라, 사용자 인터페이스가 있다. 자율배송 시스템 구성요소 간의 정보흐름은 <Fig. 4>와 같으며 각 구성요소의 자세한 역할은 다음과 같다.

1) 지능형 관제시스템

사람의 탑승을 전제로 하는 고정노선형 자율주행 서비스를 위한 관제시스템은 주로 관제를 수행하고 있는 관측자가 자율주행 모빌리티의 주행환경을 모니터링하고 비상정지를 수행하거나 제어권을 사람에게 넘기는 등의 간단한 비상조작을 수행하기 위해 개발되었다. 하지만, 사람이 전혀 탑승하지 않는 자율주행 기반 수요응답형 자율배송 서비스를 수행하기 위해서는 보다 높은 수준의 지능형 관제시스템이 요구된다. 지능형 관제시스템은 모빌리티가 서비스를 완수하기 위한 최적의 전역경로를 제공해야 하며 지속적으로 변화하는 교통소통정보를 전역경로 생성에 반영할 수 있어야 한다. 또한, 실시간으로 적재함의 상태를 모니터링하여 모빌리티의 사용 가능여부를 사용자에게 제공해야 한다.

2) 적재함 탑재 자율주행 모빌리티

자율주행 모빌리티는 관제시스템으로부터 수신한 노드(예. 출발지, 도착지, 상하차지) 단위의 전역경로를 기반으로 지역경로 계획을 수행하며, 지역경로 계획에는 관제시스템에서는 확인할 수 없는 실시간 센서정보가 추가적으로 활용된다. 실시간 센서정보를 통해 자율주행 모빌리티는 주어진 전역경로를 가장 잘 추종할 수 있는 안전한 지역경로를 생성하고 이를 따라 이동함으로써 배송을 수행한다. 적재함은 사용자에게 미리 제공된 편번호를 입력하면 개봉되고 사용자가 적재함을 닫고 어플리케이션 등으로 상하차 완료 신호를 송신하면 관제시스템에서 모빌리티에 다음 배송지로의 이동을 명령한다.

3) 정보 제공 및 송수신 인프라

자율배송 서비스를 위한 인프라는 관제시스템에 주행환경 및 교통소통정보 등을 제공하는 정보 제공 인프라(예. 지능형교통시스템, 지리정보시스템)와 각 구성요소 간의 정보 교류를 담당하는 송수신 인프라로 구분 할 수 있다. 정보 제공 인프라 중 지능형교통시스템은 공도에 설치된 계측장비를 활용하여 주기적으로 교통소통정보를 업데이트한다. ITS국가교통정보센터 교통소통정보는 일반 차량의 교차로 간 이동 시간 예상치 제공하며, 본 연구에서는 이 정보를 관제시스템에서 수집하여 자율배송에 필요한 이동 시간을 예측하고 최소의 이동 시간을 필요로하는 전역경로를 생성하는 데 활용하였다.

4) 사용자 인터페이스

수요응답형 서비스를 위해서는 사용자의 수요를 입력할 사용자 인터페이스가 필요하다. 또한, 자율배송의 경우 적재함 개봉을 원하는 사람이 적절한 사용자인지를 확인하기 위해 적재함 편번호 제공 및 상하차 완료 신호 송신이 가능한 사용자 인터페이스가 요구된다. 본 연구에서 사용한 사용자 인터페이스는 상차 및 하차 위치와 서비스 제공 시간을 각각 입력할 수 있도록 하여 사용자가 원하는 위치와 시간에 자율배송 서비스를 제공받을 수 있도록 하였다.

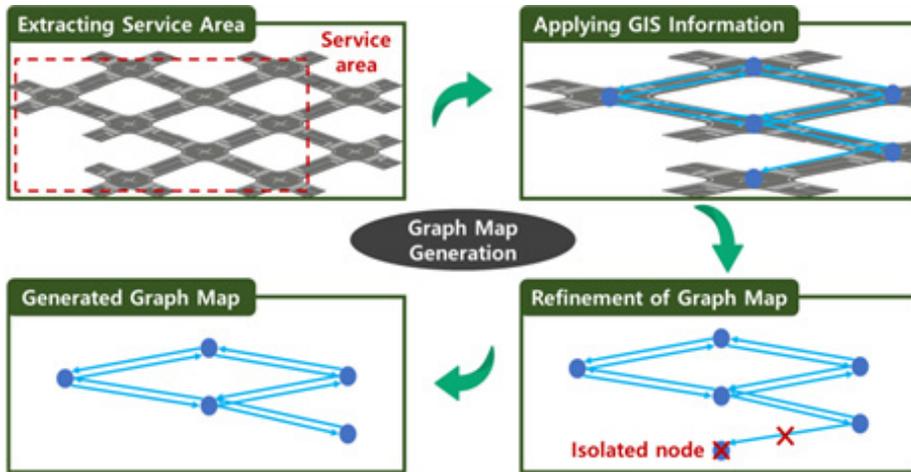
Ⅲ. 수요응답형 자율배송 서비스를 위한 전역경로 생성 시스템

개발된 수요응답형 자율배송 서비스 전역경로 생성 시스템은 다음의 과정을 통해 전체 모빌리티의 이동 시간을 최소화하는 전역경로를 생성한다. 1) 지리정보시스템과 사용자 인터페이스로부터 제공받은 교차로 및 상하차 위치를 활용하여 노드와 링크로 구성된 배송 네트워크를 구축한다. 2) 교통소통정보를 확인하여 배송 네트워크의 링크 이동에 필요한 시간을 매칭하고 이를 행렬 형태의 cost map으로 저장한다. 3) 저장된

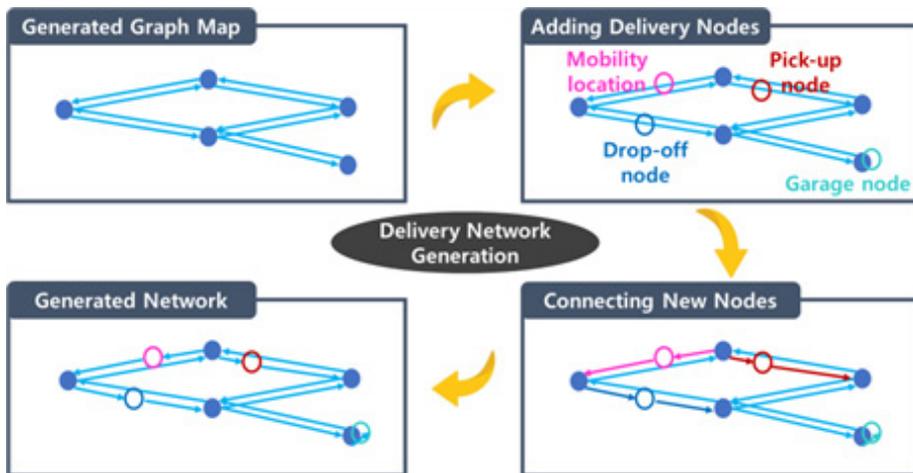
cost map을 사용해 수요응답형 자율배송 문제를 수학적으로 정의하고 이 문제를 혼합 정수 최적화를 이용해 해결한다. 이 장의 나머지 부분에서는 위의 각 과정에 대해서 보다 자세히 설명한다.

1. 사용자 수요 및 배송 네트워크 반영 서비스 권역 노드화

서비스 권역 노드화는 현실적이고 복잡한 수요응답형 자율배송 환경을 보다 단순화하기 위해 수행되며 다음의 두 가지 과정을 통해 이루어진다. 먼저, 지리정보시스템을 활용해 서비스 권역 내 교차로 노드 위치와 교차로 간 연결정보를 추출하고 교차로 노드와 링크로 구성된 교차로 네트워크를 구축한다. 그 후, 사용자 인터페이스를 통해 수집된 사용자 수요정보(예, 상하차 위치 및 시간)를 활용하여 교차로 네트워크에 상하차지 노드와 링크 등을 추가한 배송 네트워크를 구축한다. <Fig. 5>는 서비스 권역 노드-링크화 과정을 보여주며, <Fig. 6>은 교차로 네트워크에 노드와 링크를 추가하는 과정을 보여준다.



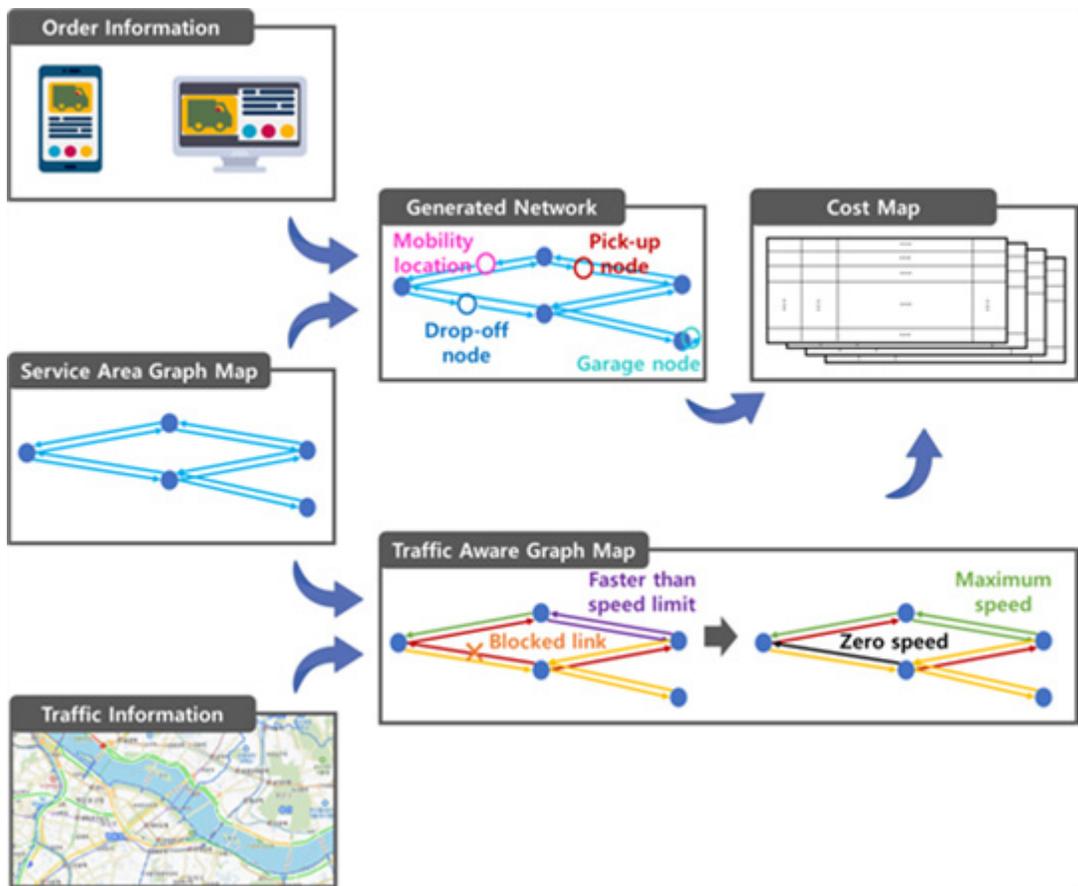
<Fig. 5> Node-link based graph map generation processes



<Fig. 6> Delivery network generation processes

2. 교통소통정보 및 사용자 수요 반영 cost map 생성

ITS국가교통정보센터는 국토교통부에서 정의한 표준노드링크 상의 교차로 간 이동에 예상되는 시간을 실시간 교통소통정보를 반영하여 제공한다. 하지만, 이 교통소통정보는 일반 차량을 기준으로 제공되는 것이기 때문에 cost map 생성에는 추가적인 정보의 가공이 필요하다. 예를 들어, 사람이 탑승하지 않는 무인 자율주행 모빌리티는 일반 차량에 비해 낮은 최대 속도 제한을 가지고 실증 또는 시범 서비스를 수행하는 지자체로부터 어린이 또는 노인 등의 교통 취약 계층 보호구역 진입금지 등 운영 관련 제약을 요구받는다. 또한, 관계시스템에서는 확인할 수 없는 도로 상황으로 인해 자율주행 모빌리티가 이동 불가능한 링크가 있는 경우 이를 cost map 생성에 반영해야 한다. <Fig. 7>은 최대 속도 제한과 이동 불가 링크를 고려한 cost map 생성 과정을 보여준다.



<Fig. 7> Cost map generation processes with maximum speed limit and blocked links

3. 혼합 정수 최적화(Mixed Integer Programming) 기반 전역경로 생성

교통소통정보 T 와 최대 속도 제한 v_{max} 그리고 이동 불가 링크의 집합 L_{NODD} 를 이용하여 생성된 k 번째 모빌리티 cost map $C^{(k)}(T; v_{max}, L_{NODD})$ 를 사용하면, 총 K 대 모빌리티 기반 수요응답형 자율배송 서비스 전역

경로 생성 문제의 비용함수 \hat{C} 를 다음의 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$\hat{C} = \sum_{k=1}^K \sum_{i \in N_k} \sum_{j \in M_{i,k}} C_{ij}^{(k)} \cdot X_{ij}^{(k)} \dots\dots\dots (1)$$

식 (1)에서 $X^{(k)} \in \mathbf{R}^{|N_k| \times |M_k|}$ 는 k 번째 모빌리티의 링크 선택여부를 나타내는 이진 행렬 변수이고 N_k 는 k 번째 모빌리티가 도달 가능한 노드(예. k 번째 모빌리티 출발지, 차고지, 상하차지)의 집합이며 $M_{i,k}$ 는 k 번째 모빌리티가 노드 $i \in N_k$ 에서 이동할 수 있는 노드의 집합이다. 다시 말해, $X^{(k)}$ 의 (i, j) 번째 원소 $X_{ij}^{(k)}$ 가 1의 값을 가지는 것은 k 번째 모빌리티가 노드 i 에서 노드 j 로 이동함을 의미한다. 변수 $C_{ij}^{(k)}$ 는 cost map $C^{(k)}(T, v_{\max}, L_{\text{NODD}})$ 의 (i, j) 번째 원소이다. III-2장에서 정의하였듯이 비용함수 \hat{C} 는 전체 모빌리티의 총 이동 시간을 의미한다. 따라서, 전체 모빌리티의 이동 시간을 최소화하는 최적의 수요응답형 자율배송 서비스 전역경로 생성 문제는 식 (2)와 같이 \hat{C} 를 최소화하면서

$$\{X^{(1)*}, X^{(2)*}, \dots, X^{(K)*}\} = \operatorname{argmin}_{X^{(1)}, X^{(2)}, \dots, X^{(K)}, S, W} \hat{C} \dots\dots\dots (2)$$

다음의 제약조건을 만족시키는 $\{X^{(1)*}, X^{(2)*}, \dots, X^{(K)*}\}$ 을 구하는 문제로 표현된다. 1) 모든 모빌리티 전역경로는 현재 위치에서 시작되어야 한다. 2) 모든 모빌리티는 최종적으로 각자의 차고지에 도착해야 한다. 3) 모든 상하차지를 모빌리티가 방문해야 한다. 4) 상하차지 방문은 사용자가 정한 서비스 제공 시간 범위 내에 이루어져야 한다. 5) 배송주문의 상차지를 방문하는 모빌리티는 반드시 해당 배송주문의 하차지도 방문해야 한다. 6) 배송주문의 상차지 방문 시간은 반드시 해당 배송주문의 하차지 방문 시간보다 빨라야 한다. 7) 상하차가 이루어지는 동안 각 모빌리티의 적재 무게는 항상 양수이며 최대 적재 한계를 넘지 않아야 한다. 8) 교차로 노드에 진입한 모빌리티는 반드시 다른 곳으로 진출해야 한다. 9) 각 모빌리티의 현재 위치로 회귀하지 않아야 한다. 10) 차고지에 도착한 모빌리티는 다른 곳으로 진출하지 않아야 한다. 식 (2)에서 (*)는 최적해를 의미하고 $S \in \mathbf{R}^{|N_k| \times K}$ 와 $W \in \mathbf{R}^{|N_k| \times K}$ 는 각각 서비스 시간과 적재물의 하중을 의미한다. 식 (2)에서 정의된 전역경로 생성 문제는 혼합 정수 최적화 솔버들(CPLEX, GUROBI, OR-Tools, SCIP)로 해결될 수 있다.

IV. 자율주행 테스트베드 모사 시뮬레이션 검증

이 장에서는 개발된 수요응답형 자율배송 서비스 전역경로 생성 시스템의 국내 환경 적용 가능성을 탐구하기 위해 상암 자율주행 테스트베드의 지리정보와 교통소통정보 활용 시뮬레이션 검증을 수행한 결과를 제공한다. 또한, 유인으로 운영되는 기존 배송 서비스와의 비교분석을 수행한다.

1. 시뮬레이션 조건

본 연구에서 각 모빌리티에 탑재된 적재함은 총 2kg의 물품을 운반할 수 있도록 설정되었고 서비스 사용자가 탑재하는 물품의 무게는 1kg으로 가정되었으며, 모빌리티의 최대 속력은 40km/h로 설정되었다. <Fig. 8>과 <Fig. 9>는 각각 상암 자율주행 테스트베드의 교차로 노드 분포와 교통소통정보 예시를 보여주고 자율배송 서비스는 <Fig. 8>의 교차로 노드들을 연결하는 도로를 이동하며 이루어진다고 가정하였다. 시뮬레이션

에서 사용된 교통소통정보는 ITS국가교통정보센터에서 제공하는 Open API를 활용하여 수집되었고, 서비스 사용자는 주문 요청 시 상하차지를 설정하고公道 주행 모빌리티가 설정된 상하차지에 도착하면 물품을 탑재하거나 수령하기 위해 모빌리티 정차 위치를 방문하는 시나리오를 상정하였다. 개발된 수요응답형 자율배송 서비스 전역경로 생성 시스템의 국내 환경 적용 가능성을 탐구하기 위해 수행된 시뮬레이션에서는 총 3대의 모빌리티가 사용되었고, 기존 유인 배송 서비스와의 비교분석을 위한 시뮬레이션에서는 총 2대의 모빌리티가 가정되었다. 각 시뮬레이션에서 사용된 상하차지 및 주문 정보는 아래의 <Table 1>과 같다. 기존 유인 배송 서비스는 방문 요청 시간 설정이 불가하므로 <Table 1>에서처럼 기존 유인 배송 서비스와의 비교 시에는 방문 요청 시간 설정 기능을 사용하지 않았다.



<Fig. 8> Intersection nodes (black circles) in the Sang-Am autonomous mobility testbed



<Fig. 9> An example of traffic in the Sang-Am autonomous mobility testbed (red: 0-10km/h, orange: 10-20km/h, green: 20-40km/h)

<Table 1> Order information for simulations

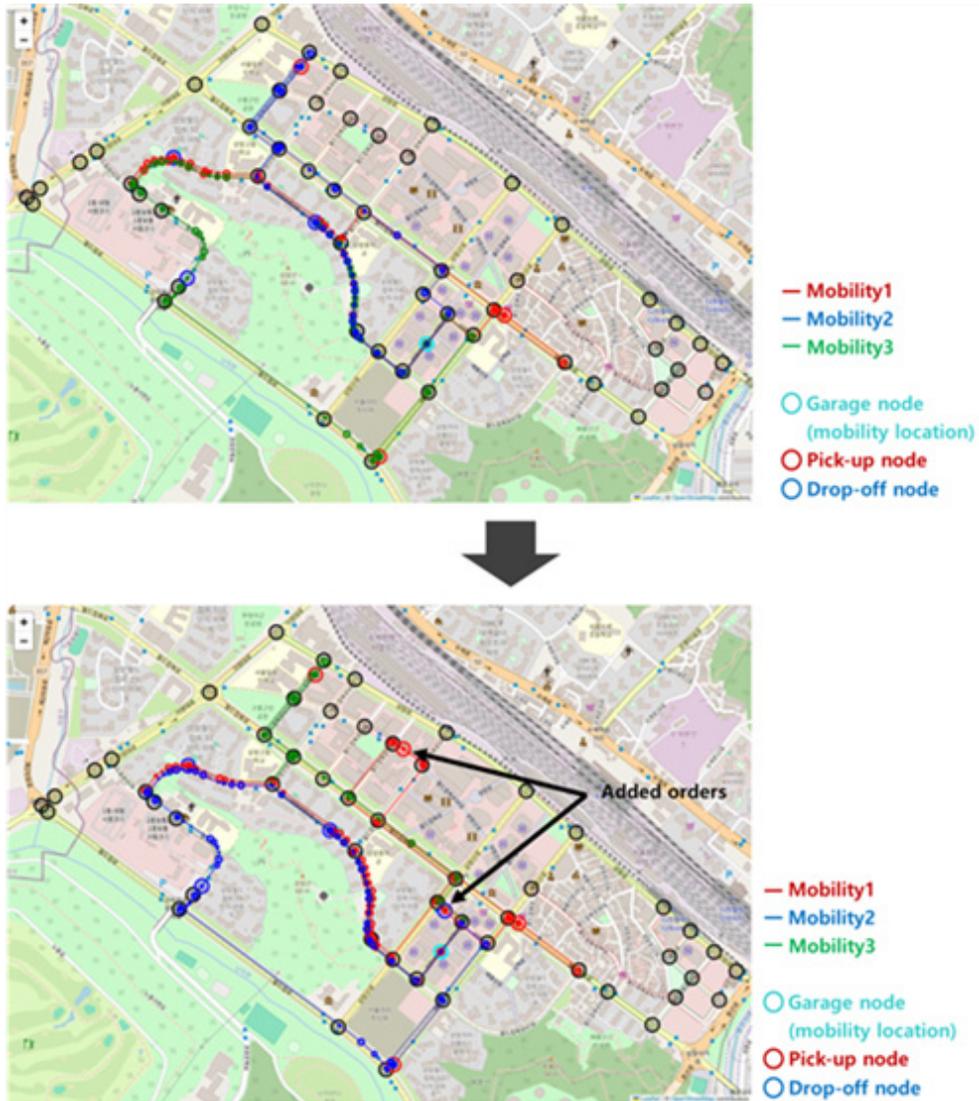
Section	Type	Pick-up	Requested Visiting Time	Drop-off	Requested Visiting Time
IV-2	Default Orders	37.583745, 126.885764	8:00 am ~ 9:00 am	37.579500, 126.886159	9:00 am ~ 10:00 am
		37.573515, 126.889165	8:00 am ~ 9:00 am	37.577986, 126.881831	9:30 am ~ 10:30 am
		37.577096, 126.892799	8:00 am ~ 9:00 am	37.581328, 126.881299	9:00 am ~ 10:00 am
IV-2-1)	Added Order	37.581838, 126.888807	8:30 am ~ 9:30 am	37.577472, 126.890297	9:30 am ~ 10:30 am
IV-3	Default Orders	37.583745, 126.885764	-	37.579500, 126.886159	-
		37.573515, 126.889165	-	37.577986, 126.881831	-
		37.577096, 126.892799	-	37.581328, 126.881299	-
		37.581838, 126.888807	-	37.577472, 126.890297	-
		37.573414, 126.889131	-	37.577044, 126.898091	-

2. 국내 환경 적용 가능성 검증 결과

국내 환경 적용 가능성 검증을 위해 전역경로 생성이 필요한 사용자 수요 변화, 모빌리티 이동 불가, 교통소통정보 갱신의 세 가지 시나리오에 대해서 시뮬레이션이 수행되었고 시뮬레이션 결과는 개발된 전역경로 생성 시스템이 적절히 전역경로를 생성하여 국내 자율배송 서비스에 적용될 수 있음을 보여준다.

1) 사용자 수요 변화에 따른 전역경로 생성 시나리오

사용자 인터페이스를 통해 새로운 주문정보가 관제시스템에 전송되는 경우, 관제시스템에서는 개발된 전역경로 생성 시스템을 활용하여 새로운 전역경로를 생성하고 이를 모빌리티에 전송한다. 만일 새로운 주문 정보를 반영했을 때 전역경로 생성이 불가능한 경우(예. 기존 주문배송 수행 불가) 사용자 인터페이스에 해당 주문 수행 불가 메시지를 송신하고 기존 전역경로로 모빌리티가 계속 이동하도록 한다. <Fig. 10>은 새로운 주문 정보를 반영한 전역경로 생성 결과를 보여준다.

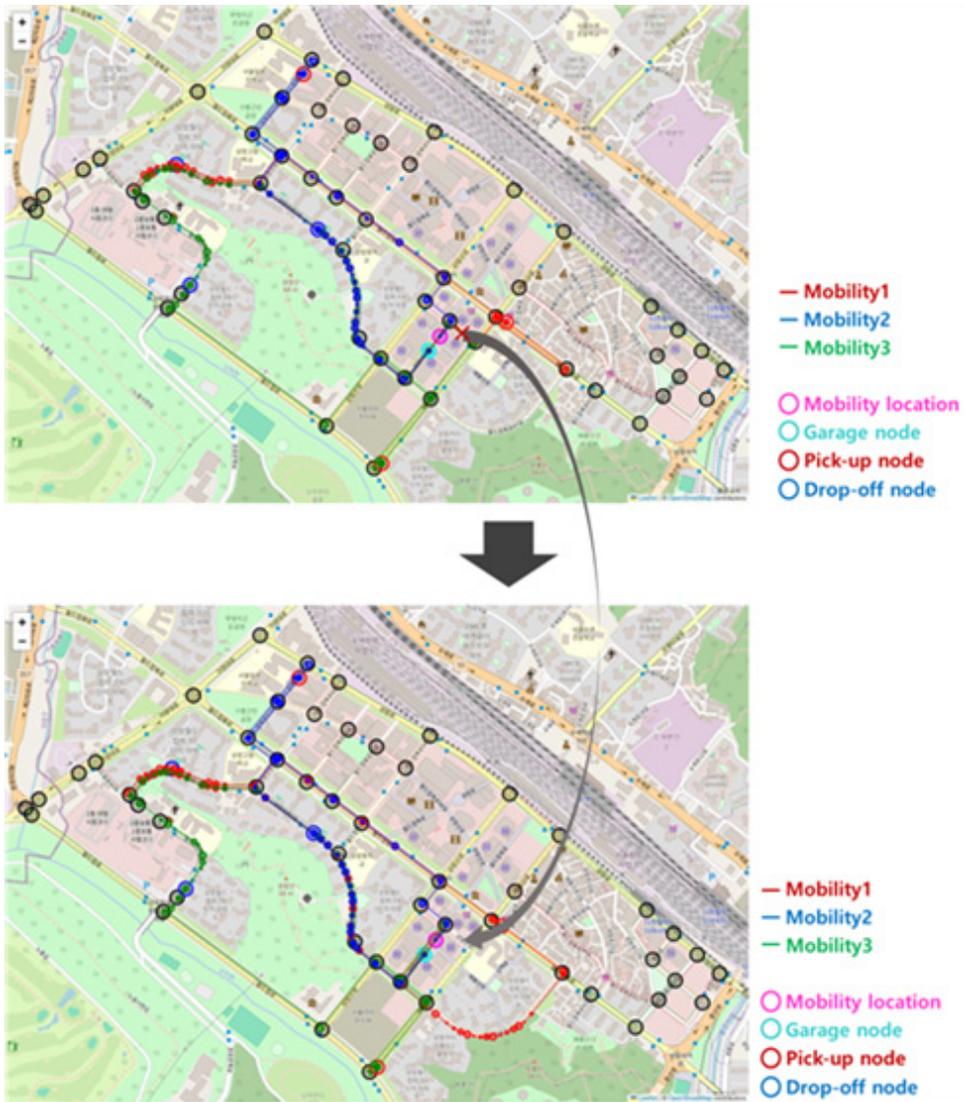


<Fig. 10> An example of global paths generated to satisfy a new delivery order

2) 모빌리티 이동 불가에 따른 전역경로 생성 시나리오

실도로 환경의 돌발적인 이벤트(예. 다른 차량 간 교통사고, 도로공사, 불법 주정차)에 대응할 수 있는 실

질적 자율배송 서비스를 운영하기 위해서는 모빌리티가 자율주행 중에 인지한 기존 전역경로 추종 불가 상황에 유기적으로 대응할 수 있어야 한다. 개발된 전역경로 생성 시스템은 모빌리티로부터 이동 불가 링크 $(i, j) \in \mathcal{L}_{\text{NODD}}$ 를 전달받아 해당 링크의 비용 $C_{ij}^{(k)}$ 을 큰 상수로 치환함으로써 이 기능을 수행할 수 있다. <Fig. 11>은 모빌리티 이동 불가 정보를 반영한 전역경로 생성 결과를 보여준다.

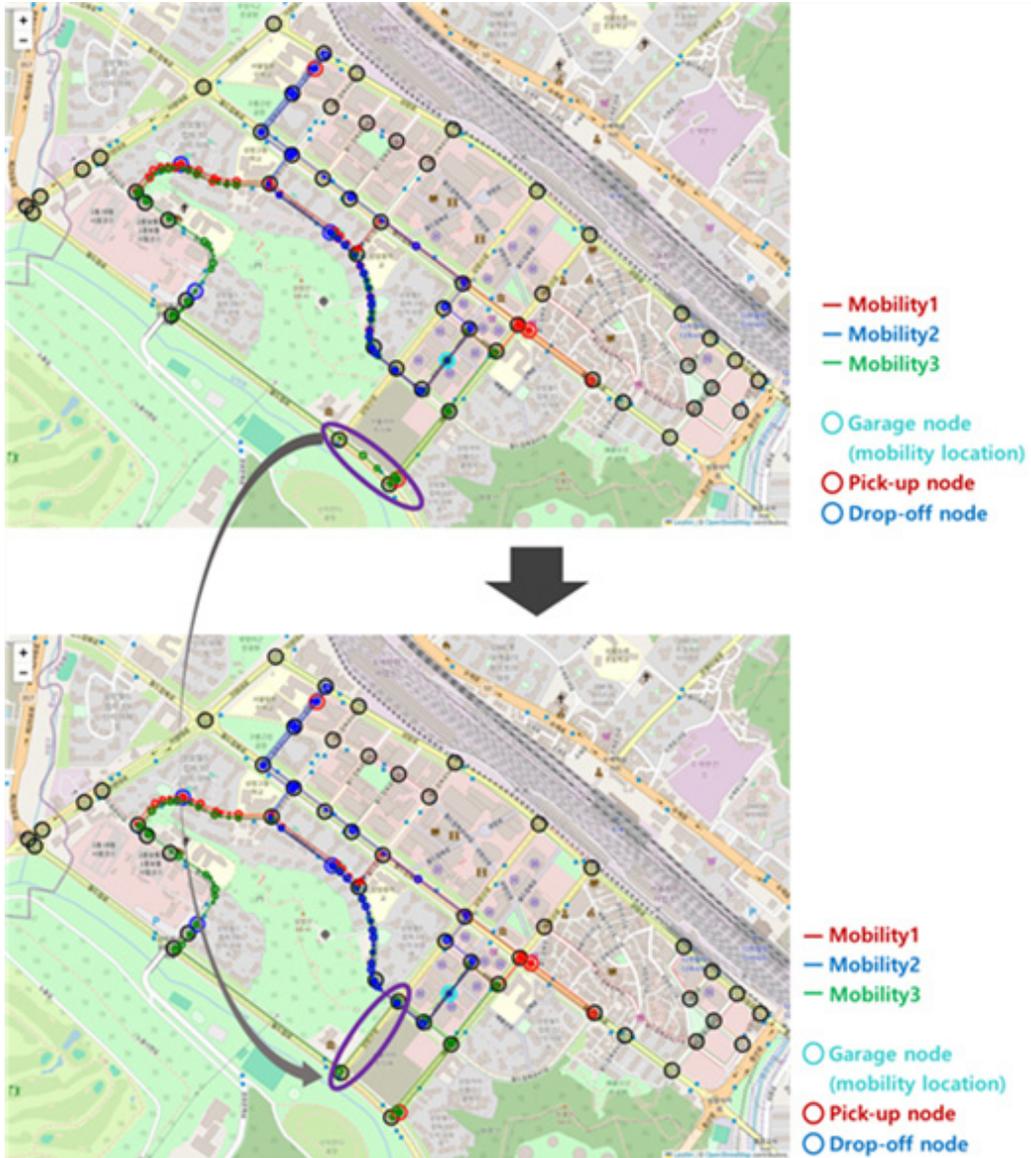


<Fig. 11> An example of global paths generated to detour a newly blocked link

3) 교통소통정보 갱신에 따른 전역경로 생성 시나리오

실도로 교통소통정보는 실시간으로 변화하며 자율배송 서비스의 서비스 수행 시간 정확도를 향상시키기 위해서는 주기적인 교통소통정보 갱신과 그에 따른 전역경로 생성이 필요하다. 본 연구에서 사용한 ITS국가 교통정보센터 교통소통정보는 5분마다 갱신되며 갱신 결과를 반영하여 생성된 전역경로는 <Fig. 12>에서 확

인할 수 있다. <Fig. 12>의 교통소통정보 갱신 이전 전역경로는 2024년 8월 5일 오전 9시 56분에 생성되었고 교통소통정보 갱신 이후 전역경로는 2024년 8월 5일 오전 10시 01분에 생성되었다.

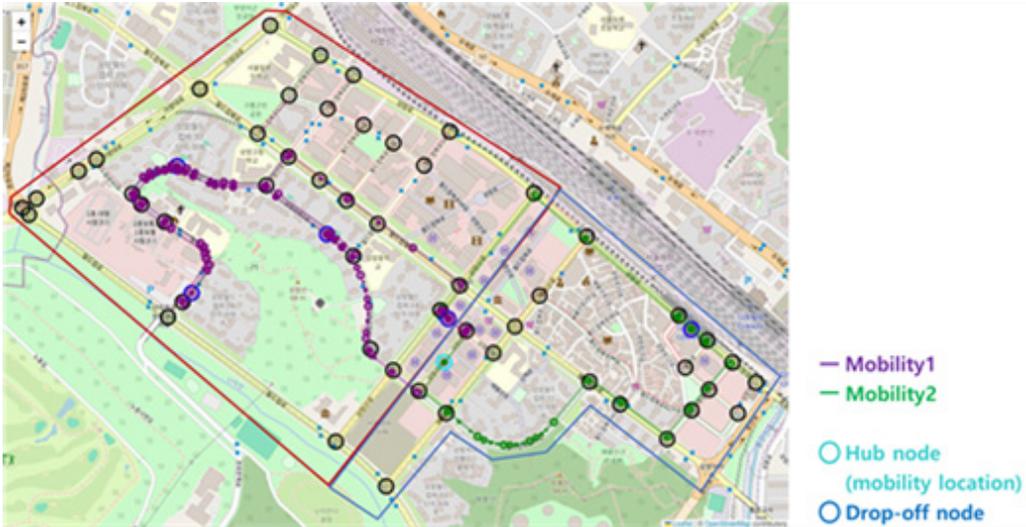


<Fig. 12> An example of global paths generated by applying updated traffic information

3. 기존 유인 배송 서비스와 개발 자율배송 서비스 비교분석 결과

개발된 전역경로 생성 시스템을 활용한 자율배송 서비스의 실효성을 확인하기 위해 기존 유인 배송 서비스와 비교분석을 수행하였다. 기존 유인 배송 서비스는 국내에서 널리 사용되는 물류 허브 기반의 유인 배송 서비스와 유인 킥 서비스가 선정되었고, 시뮬레이션을 활용한 비교분석을 통해 개발 자율배송 서비스가 기

존 유인 배송 서비스에 비해 운영 비용 절감, 물품 배송 및 공차 시간 단축의 장점을 가짐을 확인하였다. 아래의 시뮬레이션은 2024년 9월 6일 오후 2시 20분 교통소통정보를 활용하여 수행되었다.



<Fig. 13> Global paths for a hub based manned delivery service



<Fig. 14> Global paths for the developed autonomous delivery service

1) 물류 허브 기반 유인 배송 서비스와 비교

대부분의 기존 유인 배송 서비스의 경우 물류 허브를 운영하고 일정 시간 동안 수집된 주문 물품들을 물류 허브에 적재하는 과정을 거친다. 적재된 물품은 구역에 따라 정해진 배달원에 의해 배송이 이루어지며 당일 도착 보장 상품 등의 특수한 경우를 제외하면 당일 배송이 불가능한 한계가 있다. 이와 비교하여 개발 자율 배송 서비스는 물품을 적재하기 위한 별도의 물류 허브를 건설 및 운영할 필요가 없는 장점이 있다. 또한,

물품을 적재하고 분류하기까지 걸리는 시간을 단축함으로써 사용자에게 보다 빠른 배송 서비스를 제공할 수 있고, 물품 접수를 위해 사용자가 물류 허브에 방문할 필요가 없으며, 배달원의 숙련도에 따라 좌우되는 배송 품질을 상대적으로 관리하기 쉽다.

차고지를 물류 허브로 가정하고 5건의 주문이 생성되었을 때 2대의 모빌리티를 활용한 물류 허브 기반 유인 배송 서비스와 개발 자율배송 서비스를 수행하기 위해 생성된 전역경로는 <Fig. 13>과 <Fig. 14>에서 각각 확인할 수 있다. 물류 허브 기반 유인 배송 서비스 전역경로를 생성하기 위해 상암 자율주행 테스트베드를 <Fig. 13>에 표시된 것처럼 파란색과 빨간색의 두 영역으로 분할하였으며, 2대의 모빌리티가 파란색과 빨간색 영역 내 주문을 각각 담당하는 시나리오를 가정하였다. 사용자가 물류 허브에 물품을 수령하여 접수하고 분류하는데 걸리는 시간은 우체국 익일특급(오전 9시 접수 시작, 당일 오후 5시 출발) 서비스를 기준으로 중간값인 4시간으로 설정하였다. 시뮬레이션 결과 물류 허브 기반 유인 배송 서비스는 사용자 물품 접수 및 분류 시간 14,400초, 배송 시작부터 완료까지 15,087.69초(물품 상차 제외, 2대 모빌리티 배송 완료 시간 최대값), 모빌리티 주행 시간 총합 1,145.96초(물품 상차 제외)를 기록하였고 개발된 자율배송 서비스는 사용자 물품 접수 및 분류 시간 30초 이하, 배송 시작부터 완료까지 1,279.45초(물품 상차 포함, 2대 모빌리티 배송 완료 시간 최대값), 모빌리티 주행 시간 총합 1,943.53초(물품 상차 포함)를 기록하여 1,079.23%의 총 서비스 시간(물품 접수에서 배송 완료까지) 감축이 가능함을 확인하였다. 물류 허브 기반 유인 배송 서비스와 개발 자율배송 서비스 시뮬레이션 결과는 <Table 2>에서도 확인할 수 있다.

<Table 2> Simulation results for the comparison of delivery services using two mobilities

Service Type	Reception/Classification	Pick-up	Drop-off	Service	Driving (Total)	w/o Product
Hub based (Manned)	14,400s (Median)		687.69s (Maximum) 572.98s (Mean)	15,087.69s	1,145.96s (Drop-off Only)	342.05s (Drop-off Only)
One to One (Manned)	< 60s	1,618.41s (Maximum) 1404.00s (Mean)		< 1,678.41s	2,807.99s	1,941.35s
Proposed (Autonomous)	< 30s	1,249.45s (Maximum) 971.77s (Mean)		< 1,279.45s	1,943.53s	781.59s

2) 유인 퀵 서비스와 비교

물류 허브 기반 유인 배송 서비스에 비해 빠른 배송 서비스를 제공하기 위해 국내에서는 유인 퀵 서비스(one to one manned delivery service)가 제공되고 있다. 유인 퀵 서비스는 주문이 생성되는 즉시 1대의 모빌리티가 할당되어 물품을 수거하며, 수거된 물품을 바로 목적지로 운반하기 때문에 물류 허브를 거치는 배송 서비스에 비해 빠른 시간에 물품 운송이 가능한 장점이 있다. 하지만, 주문마다 모빌리티를 배정해야 하므로 운영자는 많은 수의 모빌리티와 숙련된 운전자를 확보해야 한다는 단점이 있고 물건을 수령하기 위해 이동하는 구간과 물건 배송을 완료한 후 집결지로 회귀하는 구간에서 공차 운행이 필요하다는 단점이 있다.

<Fig. 15>는 5건의 주문이 생성되었을 때 유인 퀵 서비스의 전역경로를 보여준다. 유인 퀵 서비스는 사용자 물품 접수 및 분류 시간 60초 이하, 배송 시작부터 완료까지 1,678.41초(물품 상차 포함, 2대 모빌리티 배송 완료 시간 최대값), 모빌리티 주행 시간 총합 2,807.99초(물품 상차 포함), 공차 시간 1,941.35초를 기록하였고 개발된 자율배송 서비스를 사용하는 경우 31.18%의 총 서비스 시간(물품 접수에서 배송 완료까지) 감축, 44.48%의 총 모빌리티 주행 시간 단축, 그리고 148.38%의 공차 시간 감축이 가능함을 확인하였다. 유인 퀵 서비스 시뮬레이션 결과는 <Table 2>에서도 확인할 수 있다. 유인 퀵 서비스는 2대 모빌리티 중 첫 번째

가 <Fig. 15>의 2, 3, 5번째 주문을 수행하고 나머지 모빌리티가 1, 4번째 주문을 수행한다고 가정하였다.



<Fig. 15> Global paths for an one to one manned delivery service

V. 결 론

본 연구에서는 다수의 자율주행 모빌리티를 활용한 수요응답형 자율배송 서비스 제공을 위한 교통소통정보 고려 전역경로 생성 시스템이 개발되었다. 교통소통정보가 반영되지 않은 기존 전역경로 생성 시스템과 달리 개발된 전역경로 생성 시스템은 주기적으로 갱신되는 교통소통정보에 따라 전역경로를 갱신하여 서비스 수행 시간의 정확도를 향상시킬 수 있도록 설계되었다. 또한, 서비스 지역의 지리정보가 반영되지 않은 기존 전역경로 생성 시스템과 달리 서비스 지역의 교차로 노드와 링크 정보를 반영하여 현실적인 자율배송 서비스가 가능하도록 개발되었다. 개발된 수요응답형 자율배송 서비스 전역경로 생성 시스템은 국내 실증이 가능한 상암 모빌리티 자율주행 테스트베드 모사 시뮬레이션 환경에서 검증되었으며 자율배송 서비스 중 발생할 수 있는 사용자 수요 변화, 모빌리티 이동 불가, 교통소통정보 갱신의 세 가지 시나리오에 대해서 적절한 전역경로를 생성함을 확인할 수 있었다. 또한, 기존 유인 배송 서비스와의 비교분석을 통해 운영 비용 절감, 공차 시간 및 물품 수령 시간 단축이 가능함을 확인하였다.

개발된 수요응답형 자율배송 서비스 전역경로 생성 시스템을 활용하면 세계적인 인구 감소와 인건비 상승 그리고 인플레이션 추세에 따른 문제를 다소 해소할 수 있을 것으로 예상되며 자율배송 서비스 사용자 및 운영자에게 일상적인 편의성과 운영 비용 절감의 효과를 제공할 것으로 기대된다. 또한, 자율주행 모빌리티를 활용한 서비스 상용화를 앞당기고 연구 및 개발 중에 축적한 노하우를 응용하여 보다 다양한 자율주행 모빌리티 기반 서비스 개발을 촉진할 수 있다.

향후에는 실제 자율주행 모빌리티와 개발된 관제시스템을 연동하여 실제 상암 자율주행 테스트베드 환경에서 실증을 수행할 계획이며, 자율주행 모빌리티의 특성(예. 배터리 잔량 및 소모량)을 추가적으로 반영하여 개발된 전역경로 생성 시스템을 고도화할 계획이다. 또한, 혼합 정수 최적화 기반 전역경로 생성 기법의

단점인 주문 증가에 따른 연산속도 지연을 완화하는 방법에 관한 이론 연구와 퍼스트 마일에서 라스트 마일에 이르기까지 배송 서비스 전구간 무인화를 위한 추가적인 연구도 수행할 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENTS

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구(20024368)입니다.

REFERENCES

- Alvarenga, G. B., Mateus, G. R. and De Tomi, G.(2007), “A genetic and set partitioning two-phase approach for the vehicle routing problem with time windows”, *Computers & Operations Research*, vol. 34, no. 6, pp.1561-1584.
- Helsgaun, K.(2000), “An effective implementation of the Lin-Kernighan traveling salesman heuristic”, *European Journal of Operational Research*, vol. 126, no. 1, pp.106-130.
- Helsgaun, K.(2009), “General k-opt submoves for the Lin-Kernighan TSP heuristic”, *Mathematical Programming Computation*, vol. 1, no. 2-3, pp.119-163.
- Ho, S. C., Szeto, W. Y., Kuo, Y. H., Leung, J. M., Petering, M. and Tou, T. W.(2018), “A survey of dial-a-ride problems: Literature review and recent developments”, *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 111, pp.395-421.
- Janinhoff, L., Klein, R., Sailer, D. and Schoppa, J. M.(2024), “Out-of-home delivery in last-mile logistics: A review”, *Computers and Operations Research*, vol. 168, pp.1-20.
- Kim, J., Kim, J. and Yeo, H.(2020), “Study on multi-vehicle routing problem using clustering method for demand responsive transit”, *Journal of the Korea Institute of Intelligent Transportation Systems*, vol. 19, no. 5, pp.82-96.
- Kim, K. and Cho, S.(2023), “An optimal route algorithm for automated vehicle in monitoring road infrastructure”, *Journal of the Korea Institute of Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 1, pp.265-275.
- Laporte, G.(2009), “Fifty years of vehicle routing”, *Transportation Science*, vol. 43, no. 4, pp.408-416.
- Mokhtarian, A., Kampmann, A., Lueer, M., Kowalewski, S. and Alrifaae, B.(2021), “A cloud architecture for networked and autonomous vehicles”, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 54, no. 2, pp.233-239.
- Nazari, M., Oroojlooy, A., Takác, M. and Snyder, L. V.(2018), “Reinforcement learning for solving the vehicle routing problem”, *32nd Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2018)*, pp.1-11.
- Oh, S., Sechadri, R., Azevedo, C. L., Kumar, N., Basak, K. and Ben-Akiva, M.(2020), “Assessing the impacts of automated mobility-on-demand through agent-based simulation: A study of Singapore”, *Transportation Research Part A: Policy Practice*, vol. 138, pp.367-388.
- Psaraftis, H. N.(1980), “A dynamic programming solution to the single vehicle many-to-many

immediate request dial-a-ride problem”, *Transportation Science*, vol. 14, no. 2, pp.130-154.

Toth, P. and Vigo, D.(2014), *Vehicle routing: Problems, methods, and applications*, SIAM.

Zong, Z., Tong, X., Zheng, M. and Li, Y.(2024), “Reinforcement learning for solving multiple vehicle routing problem with time window”, *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, vol. 15, no. 2, pp.1-19.