

정체를 고려한 Personal Rapid Transit 배차 및 경로 계획 알고리즘

A Dispatching and Routing Algorithm for Personal Rapid Transit by Considering Congestion

한 충균* · 김 백현** · 정 락 교** · 하 병 현*
(Chung-Kyun Han · Baek-Hyun Kim · Rag-Gyo Jeong · Byung-Hyun Ha)

Abstract - Personal rapid transit (PRT) is getting attention as a new form of transportation. It is energy efficient and provides the high level of passenger service. In this study, the dynamic PRT dispatching and routing problem is dealt with. Passengers request transportation service on a complex network, and an operating system monitors passenger arrivals and coordinates vehicles in real time. A new online dispatching and routing algorithm is proposed, which minimizes the total travel distance of vehicles and the waiting time of passengers. The algorithm dispatches vehicles by considering multiple vehicles' state and multiple passengers at the same time. In particular, finding the shortest-time path is attempted by taking into account the future congestion on lanes. Discrete-event simulation is employed to validate the performance of the proposed algorithm. The results show the algorithm in this study outperforms others.

Key Words : Personal rapid transit(PRT), Dynamic pickup and delivery, Vehicle dispatching and routing, Congestion

1. 서 론

Personal Rapid Transit (PRT)는 전기를 동력으로 하는 소형 무인 궤도 차량이다. 일반적인 대중교통 수단에 비해 PRT는 무게가 가볍고 에너지 효율이 높으며 수요 응답형(on-demand)으로 운영할 수 있어 차세대 대중교통 수단으로 주목받고 있다. 버스와 전철은 많은 수의 승객이 함께 탑승한다. 따라서 에너지 효율은 높으나 개별 승객은 목적지에 곧바로 도착하지 못하는 불편을 감수해야 한다. 반면 택시는 목적지까지 정차 없이 운행되지만 에너지 효율이 낮다. PRT는 전용 선로 상에서 운행되며 정류장이 주행 차로에서 떨어져 있어(off-lane) 무정차(non-stop) 서비스를 제공할 수 있다. 또한 통합 운영 시스템에서 차량 경로를 계획하고 통제하므로 교통 혼잡을 예측하여 보다 효율적으로 운영하는 것이 가능하다[1].

우리나라를 비롯하여 세계 여러 나라에서 이미 PRT를 사용하고 있거나 도입을 추진 중에 있다. 영국의 히드로국제공항은 터미널과 주차장 사이를 이동하는 승객을 위하여 2011년부터 PRT를 운영하고 있으며, 아랍에미리트는 마스다르 시티의 일부 구역

부터 시작하여 점차 적용 범위를 넓혀가고 있다. 국내에서는 2013년 순천만 국제정원박람회에서 관람객의 편의를 위하여 PRT를 운행하였으며 현재도 서비스 중에 있다. 하지만 복잡한 노선망과 승객이 많은 도심에서 효과적인 대중교통 수단으로 자리매김하기 위해서는 다수의 차량을 적절하게 배차할 수 있는 최적화된 운영 방식이 필수적으로 요구된다[2].

본 연구는 PRT 시스템 운영을 위한 동적 수송 문제(dynamic pick-up and delivery problem)를 다룬다. 일반적으로 동적 수송 문제는 차량 배차 단계와 경로 계획 단계로 나누어 접근한다. 먼저 차량 배차는 승객에게 적절한 차량을 할당하는 단계로 대부분 휴리스틱 방법론을 사용한다[3-11]. PRT 시스템과 같이 승객이 동적으로 도착하는 환경에서는 확정된 계획을 수정하여 재배차하는 경우 더 나은 해를 제시할 수 있다[8-11]. 경로 계획 단계에서는 차량이 목적지까지 이동하는 경로와 이동시 간섭이 예상되는 차량 간의 우선순위를 결정한다. 이를 위해 zone control, Petri net, time windows 등과 같은 다수 차량을 조율하는 기법을 활용한다[12-17]. 하지만 이와 같이 단계를 구분하는 경우 다른 단계의 계획을 충분히 활용하지 못하는 단점이 존재한다. 예를 들어, 배차에 초점을 맞춘 연구는 차량이 항상 최단 거리 경로를 따라 주행한다고 가정하고, 경로 계획 연구에서는 배차 계획이 확정되어 바꿀 수 없는 것으로 취급한다. 따라서 보다 나은 대안을 탐색하지 못하는 경우가 발생한다. 그러나 문제의 복잡도로 인해 두 단계를 동시에 고려하는 연구는 제한적으로 이루어졌다[18-20].

본 연구에서는 차량 배차와 경로 계획을 함께 고려하는 새로

† Corresponding Author : Dept. of Industrial Engineering,
Pusan National University, Korea

E-mail : bhha@pusan.ac.kr

* Dept. of Industrial Engineering, Pusan National University, Korea

** Korea Railroad Research Institute, Korea

Received : October 8, 2015; Accepted : October 29, 2015

운 PRT 운영 방식을 제안한다. 이를 위해 다수의 PRT 차량과 여러 승객을 동시에 고려하여 체계적인 배차를 수행하는 기존 연구[11]를 확장하고 동시에 time window를 활용하여 정체를 고려한 경로 계획을 수립한다. 즉 기존의 최단거리 경로대신 정체를 고려하여 이동 시간을 예측하고 경로를 계획한다. 특히 단선으로 구성되는 PRT 도로망에서는 정체 구간을 회피하는 것이 중요하다. 이를 위해 기존의 분기 및 합류 지점에서만 점유여부를 판단하는 방법론을 확장하여 차량의 점유여부를 예상하고 경로 계획에 반영한다. 제안된 방법론의 성능을 평가하기 위해 시뮬레이션을 통해 기존 방법론과의 비교 실험을 수행하였다. 승객 편의성과 에너지 효율성을 검토하기 위하여 승객의 평균 대기시간과 PRT의 총 이동거리를 성능지표로 비교하였으며, 본 연구에서 제안한 방법론의 우수성을 확인할 수 있었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 PRT 차량 배차 및 경로 계획 문제를 정의한다. 그리고 3장에서 배차 및 경로 계획 방법론을 설명하고, 4장에서 시뮬레이션 실험을 통하여 알고리즘의 성능을 검증한다. 마지막으로 5장에서 결론 및 추후 연구에 대하여 논한다.

2. 문제 정의

PRT 시스템의 네트워크는 정류장(station), 분기 및 합류점(junction), 단방향 차로로 구성된다(그림 1). 정류장의 진·출입 구간 및 곡선 구간에는 안전상 이유로 최고 주행 속도를 제한한다. 승객은 정류장에 있는 키오스크를 이용하여 운영 시스템에 차량 배차를 요청한다. PRT 운영 시스템은 승객의 도착 시점과 차량에 탑승 중인 승객이 하차하는 시점에 의사결정을 수행한다. 구체적으로 차량 상태(위치, 경로)와 승객 정보(도착 정류장, 도착 시각)를 입력받아 배차 및 경로 계획에 대한 결과를 제시한다.

정류장 내부는 그림 2와 같이 주선로(main line)와 승차장(berth)으로 구성된다. 주선로는 해당 정류장이 최종 목적지가 아

닌 차량이 지나가는 차로이다. 승객은 승차장에서 차량을 탑승하거나 하차한다. 정류장에는 한정된 수의 승차장이 존재한다. 따라서 모든 승차장에 차량이 들어와 있는 경우, 나중에 도착한 차량은 승차장에 진입하지 못한다. 본 연구에서는 정류장과 분기 및 합류점을 노드(node)로, 차로는 아크(arc)로 정의하여 PRT 네트워크를 표현한다. 각 노드와 아크에는 허용량이 존재한다. 정류장 노드에는 승차장의 수만큼 차량이 동시에 진입할 수 있으며 분기 및 합류점의 허용량은 차량 한 대이다. 마지막으로 아크의 허용량은 차량의 길이를 차량의 길이와 안전거리의 합으로 나눈 값보다 작은 가장 큰 정수로 한다. 예를 들어 차량이 10m, PRT 차량의 길이가 2.5m, 안전거리가 1m라면, $10/3.5 \approx 2.85$ 로 해당 차량의 허용량은 2가 된다.

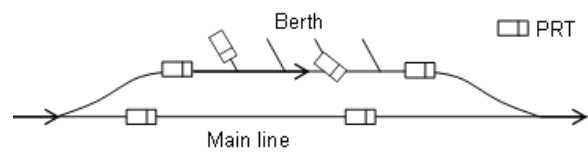


그림 2 정류장 레이아웃
Fig. 2 Station layout

PRT 시스템에서 승객은 차량을 탑승한 후에 목적지를 입력하는 것으로 한다. 그리고 추가적인 가정 사항은 다음과 같다.

- PRT 차량의 수는 일정하고 차량의 종류는 같다.
- 차량은 선로에 미리 정해진 평균 속도의 $\pm 10\%$ 안의 범위에서 주행한다.
- 앞 선 차량이 선로 위에서 정차하고 있는 경우, 뒤따르던 차량은 안전거리 뒤에 정차한다(정체 상황).
- 유류 차량은 정차 정류장(parking station)으로 이동한다.
- 정차 정류장은 도착하는 차량을 모두 수용할 만큼 충분한 공간을 가진다.
- 승객이 차량을 승차할 때 일정 정도 시간이 소요된다.
- 승객은 PRT 차량이 도착할 때까지 정류장을 떠나지 않는다.
- 동일 정류장에서 먼저 도착한 승객의 우선순위는 나중에 도착한 승객보다 높다.

본 연구는 환경적 요소와 승객 서비스 수준을 고려하여 총 차량 이동거리와 승객 대기시간을 최소화하는 목표로 한다. 그리고 승객 대기시간에 대하여 평균, 90th percentile, 최대값을 측정하여 서비스 수준을 평가한다. 또한 차량 이동거리와 승객 대기시간 모두 고려한 다목적(multi-objective)의 관점에서도 알고리즘의 성능을 평가한다.

3. 배차 및 경로 계획 알고리즘

여러 승객에 대하여 다수의 차량을 배차하는 것은 할당 문제로 표현이 가능하다. 할당 문제는 제한된 자원(resource)을 사용하여 최소의 총비용으로 작업(task)을 수행하는 해를 구하는 것

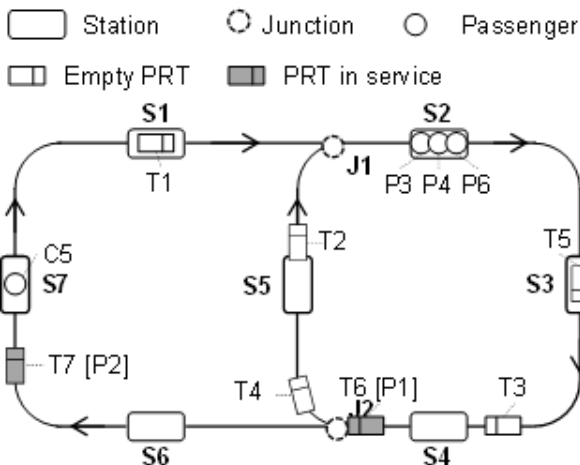


그림 1 PRT 배차 및 경로 계획 문제 예시
Fig. 1 PRT dispatching and routing problem example

이다. 하나의 자원은 하나의 작업을 처리할 수 있으며 각 자원이 특정 작업을 처리하는 비용은 정해져있다. 본 연구에서는 이를 PRT 배차에 적용한다. 즉 PRT 차량을 대기 승객에 최소의 총비용으로 할당하는 배차 계획을 찾는다. 이와 같은 PRT 할당 문제는 행렬로 표시할 수 있으며 표 1은 예시를 보여준다. 표에서 행과 열은 각각 PRT 차량과 승객을 나타내며 원소는 해당 PRT 차량을 승객에게 할당했을 때의 비용을 나타낸다. 본 연구에서는 승객의 예상 대기시간(expected waiting time, EWT)으로 그 비용을 정의한다. 이전 연구[11]의 경우 이를 최단 거리 경로를 이용하여 추정하였다. 하지만 차량 간의 간섭으로 인하여 정체가 발생하는 경우 추정된 EWT와 실제 승객의 대기시간 차이가 커질 수 있다. 따라서 본 연구는 정체를 감안한 최단 소요시간을 추정하여 EWT를 보다 정확하게 산정한다.

표 1 할당 비용과 할당 결과

Table 1 Assignment cost matrix and the result

	P3	P4	P5	63
T1	20	20	100	20
T2	17	17	97	17
T3	45	45	45	45
T4	27	27	107	27
T5	60	60	60	60

이전 연구[11]와 유사하게 본 연구에서도 주어진 특정 상태의 차량만을 배차 대상 차량으로 설정한다. 이를 배차 범위라 정의한다. 정차 정류장에 위치하여 배차를 기다리는 PRT는 Idle 상태이며, 할당된 승객을 태우기 위해 공차이동을 하는 PRT는 Approaching 상태이다. Transiting은 승객의 태우고 이동하는 상태이며, Parking은 정차 정류장으로 이동 중인 차량을 의미한다. 범위는 각 상태의 머리글자를 조합하여 표현한다. 예를 들어 IA

는 Idle과 Approaching 상태의 차량을 배차 대상으로 고려한다는 것을 의미한다. Approaching 상태에 있는 차량은 이미 배차된 승객이 있으며 Transiting 상태의 차량 역시 다음 승객에게 배차되어 있을 수 있다. 따라서 I와 T를 포함하는 배차 범위를 사용하는 경우 기존 배차 계획을 수정하는 재배차를 가능하게 한다.

표 1은 그림 1의 예제에서 배차 범위가 IA일 때의 비용행렬이다. 즉 Idle 상태에 있는 T1, T5와 Approaching 상태에 있는 T2, T3, T4를 배차 대상 차량으로 고려한다(그림 1에 *로 표시). 본 연구는 할당 문제의 해를 구하기 위하여 Hungarian method를 이용한다. 표 1에서 최적 배차 결과는 음영으로 표시되어 있으며 이때의 총비용은 109이다.

본 연구는 최단 시간 경로를 구하기 위하여 정체를 고려한 conflict-free shortest path finding 알고리즘(CF 알고리즘)을 제시한다. CF 알고리즘은 time window 방법 기반의 알고리즘이다[14-17]. Time window는 각 노드에 대한 차량의 점유 유무를 시간별로 나타낸 것으로 점유 기간(reserved time window)과 유휴 기간(free time window)로 구분되고, 최단 시간 거리 경로를 구하는데 사용되는 개념이다.

CF 알고리즘의 실행을 위해 먼저 네트워크 정보, 차량의 경로 정보를 바탕으로 시뮬레이션을 수행하여 점유 기간을 예측한다. 예를 들어, 그림 3(a)와 같이 네트워크와 차량의 경로 정보가 주어지면, 그림 3(b)와 같이 각 노드에 대한 차량의 점유 기간이 구해진다. 이때 점유 기간이 아닌 시간은 유휴 기간으로 경로 계획이 필요한 차량이 해당 노드에 진입 가능한 시간을 의미한다.

Time window에 대한 상세한 표기는 아래와 같다.

$R = \{r_n^k\} = \{[c_n^k, d_n^k]\}$: 점유 기간의 집합, r_n^k 은 노드 n 의 k 번째 점유 기간

$F = \{f_n^k\} = \{[a_n^k, b_n^k]\}$: 유휴 기간의 집합, f_n^k 은 노드 n 의 k 번째 유휴 기간

c_n^k 와 d_n^k 는 점유 시간과 유휴 시간의 시작되는 시간을 나타내고, a_n^k 와 b_n^k 끝나는 시간을 의미한다. 그림 3(b)에 따르면, r_{N2}^2 는

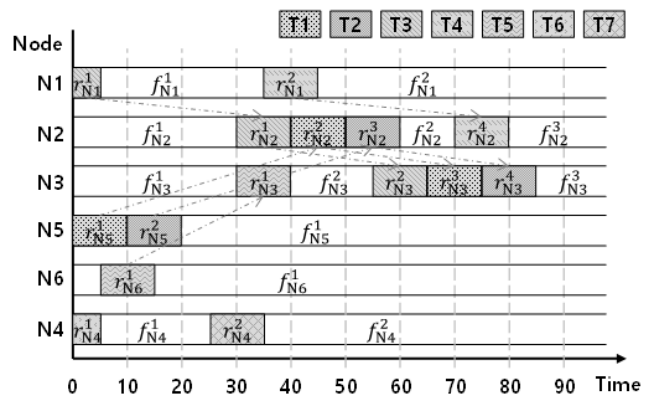
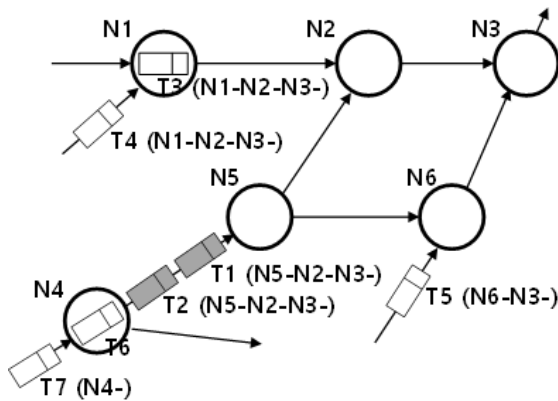


그림 3 각 노드에 대한 time window 계산

Fig. 3 Calculation of time windows for each node

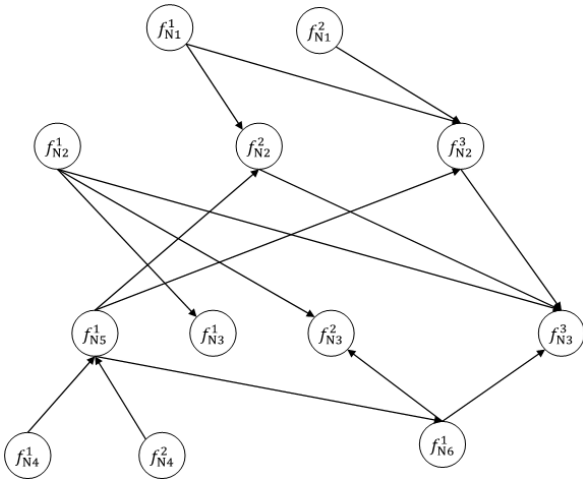


그림 4 유휴 기간 그래프
Fig. 4 Free time window graph

40 시점에서 50 시점까지의 기간 동안 노드 N2를 점유하며 이것은 해당 노드의 두 번째 점유 기간을 의미한다.

각 노드의 유휴 기간이 정해지면 그림 4와 같은 유휴 기간 그래프(free time window graph)를 구축한다.

노드는 유휴 기간을 의미하며 이를 유휴 기간 노드라고 한다. 두 유휴 기간 노드 사이의 아크는 아래의 두 조건을 만족할 때 형성된다.

- 물리적으로 두 지점이 연결되어 있다.
- 차량의 길이와 평균 속도를 고려할 때 차량이 순차적으로 두 유휴 기간을 점유할 수 있다. 즉 다른 차량과 충돌 없이 운행될 수 있다.

예를 들어, 노드 N1과 N2는 물리적으로 연결되어있다. 하지만 경로 계획을 하고자 하는 차량이 f_{N1}^1 를 점유하며 $5(=a_{N1}^1)$ 에 출발하여도 N2에 도달할 수 있는 시간은 $30(=b_{N2}^1)$ 을 초과한다. 따라서 f_{N1}^1 과 f_{N2}^1 사이에는 아크가 생성되지 못한다.

CF 알고리즘에서는 차량의 허용량과 정체 가능성을 고려한다. $\mathcal{T}(f_i^p, f_j^q)$ 는 차량이 f_i^p 과 f_j^q 를 순서대로 점유하며 지나갈 경우, 예측되는 정체 종료 시간을 나타낸다. 해당 변수는 $f_j^{(q-1)}$ 와 f_j^q 사이의 점유 기간 중 노드 i 를 바로 직전에 지나온 차량에 의하여 결정된다. 즉, 두 유휴 기간 사이에 차로 $i-j$ 를 이용한 차량을 파악한다. 그리고 만일 이 차량들의 길이와 안전거리의 합이 차량의 허용량을 초과할 경우, 차로 $i-j$ 의 가장 앞 차량이 노드 j 에 진입을 시작하는 시간을 $\mathcal{T}(f_i^p, f_j^q)$ 로 기록한다. 그림 3에서 $\mathcal{T}(f_{N5}^1, f_{N2}^2)$ 를 살펴보면 f_{N5}^1 과 f_{N2}^2 사이에서 노드 N5를 지나온 차량은 T1과 T2이며, 두 차량은 아크 N5-N2의 허용량인 2를 초과한다. 따라서 $\mathcal{T}(f_{N5}^1, f_{N2}^2)$ 는 해당 선로의 가장 앞에 있는 T1이 노드 N2에 진입하기 시작한 시간 $40(=c_{N2}^2)$ 이다.

CF 알고리즘은 그림 5와 같다. 알고리즘 중 sn (start node) 은 차량의 현재 위치를 의미하고 dn (destination node)은 목적

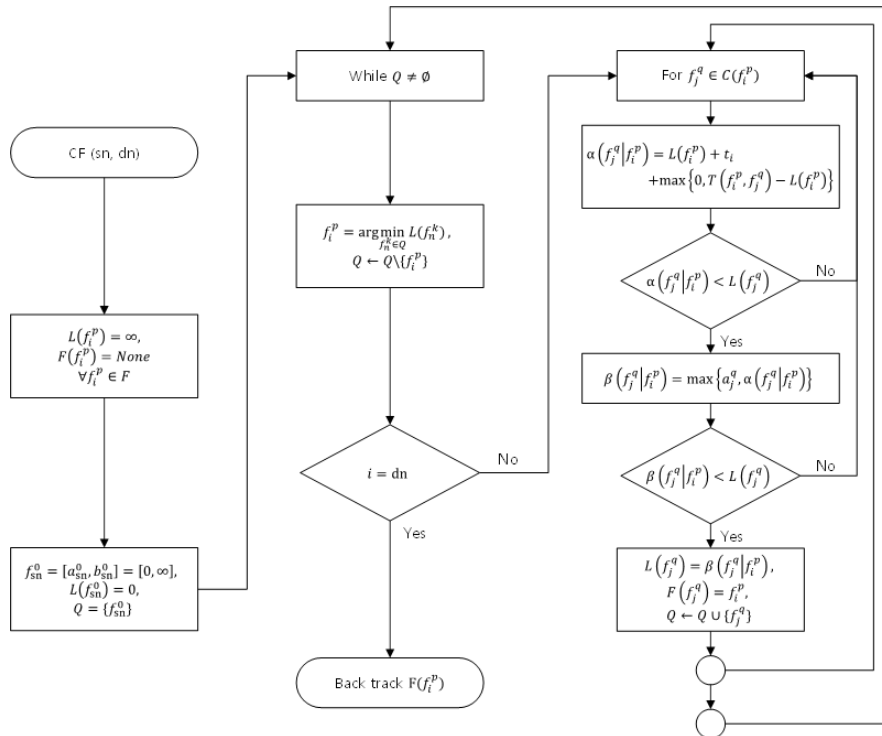


그림 5 CF 알고리즘의 흐름도
Fig. 5 Flow chart of CF algorithm

지인 노드를 의미한다. 그리고 t_n 는 노드 n 을 차량이 지나가는데 걸리는 시간이며, $t_{(i,j)}$ 는 아크 (i,j) 를 지나가기 위해 최소 소요 시간이다. $C(f_i^j)$ 는 f_i^j 와 아크로 연결된 유휴 구간의 집합이다. 알고리즘 내에서 사용되는 변수의 설명은 다음과 같다.

- Q : 유휴 기간의 리스트를 저장하고 있는 자료 구조
- $L(f_i^i)$: f_i^i 내에서 노드 i 에 도달할 수 있는 가장 이른 시간
- $\alpha(f_j^j|f_i^i)$: f_j^j 에서 f_i^i 를 점유하며 지나간다고 할 경우, 노드 i 를 벗어날 수 있는 가장 이른 시간
- $\beta(f_j^j|f_i^i)$: f_j^j 에서 f_i^i 를 점유하며 지나간다고 할 경우, 노드 j 에 도착할 수 있는 가장 이른 시간
- $F(f_j^j)$: 차량이 f_j^j 를 점유하기 전에 지나온 유휴 기간

4. 시뮬레이션 실험

본 연구는 시뮬레이션 실험을 통하여 PRT 배차 및 경로 계획 알고리즘을 검증한다. 그림 6은 비교 실험을 위하여 사용된 가상 네트워크이다. 해당 네트워크는 국내 특정 도시를 바탕으로 구축되었다. 총 23개의 정류장이 있으며, 각 정류장에는 4개의 승차장이 존재한다. 해당 네트워크에서 운영되는 PRT 차량의 수는 70대이다. PRT 차량은 직선 구간에서 20m/s로, 정류장 간·출입 구간에서 10m/s로, 곡선 구간에서 14m/s로 주행한다. 각 정류장은 원으로 표시되어있고, 이름이 'S'로 시작하면 승객이 승·하차하는 지점이며 'P'로 시작하면 정차 정류장임을 뜻한다.

승객 수효는 지역별로 불균등(imbalance)하며 정류장별 승객의 발생 비율이 다르다. 실험에서 사용한 승객의 발생 비율은 표 2를 사용한다. 표에서 행과 열은 승객의 출발지(origin)와 목적지(destination)를 의미하며 각 원소는 가중치를 나타낸다. 모든 원소의 총합은 1013.07이다. 실험에서는 총도착율 λ (명/초)

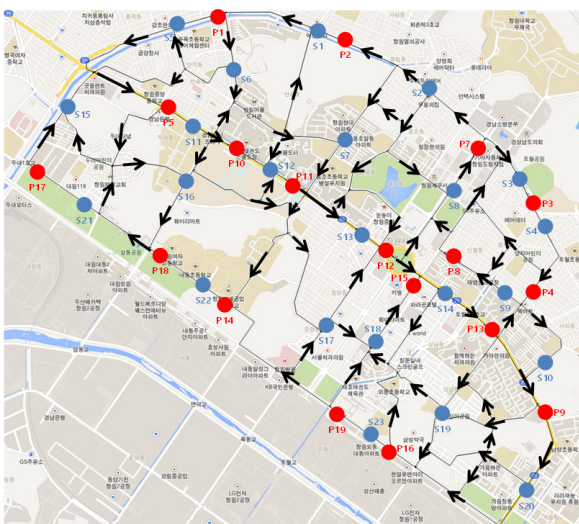


그림 6 실험 네트워크
Fig. 6 Network for experiments

를 사용하여 승객을 발생시킨다. 예를 들어 S1에서 S12로 가는 승객은 가중치가 36.092이므로 만일 $\lambda=0.1$ 이라면 이는 시간당 $0.1 \cdot 36.092 / 1013.07 = 12.8$ 명이 발생함을 의미한다. 표에서 네트워크의 중심에 있는 S12와 S13을 나타내는 행의 값이 상대적으로 큰 것을 볼 수 있다. 이는 두 정류장 근처에 다수의 차량이 몰려 정체 현상이 발생함을 나타낸다. 승객은 포아송 과정에 따라 도착하며, 승객 승하차 시간은 60초와 90초를 모수(parameter)로 하는 균등 분포(uniform distribution)를 따른다.

본 연구에서는 총도착율 λ 를 0.080부터 0.115까지 0.005의 간격으로 설정하여 실험을 수행한다. 이는 시간당 승객의 탑승 요청이 총 288명부터 시작하여 18명($\lambda=0.005$)씩 증가하는 것을 의미한다. 그리고 각 도착율에 대해 10번 반복 실험을 수행한다. 안정상태의 성능을 평가하기 위하여 총 24시간의 시뮬레이션 중 초기 2시간을 제외한 통계치를 사용한다. 승객의 평균 대기시간이 지속해서 증가하는 경우 시스템이 안정 상태에 이르지 못하는 것을 의미하므로 분석에서 제외한다.

본 연구는 시뮬레이션 실험에서 배차 규칙과 경로 계획 알고리즘의 성능 차이를 비교한다. 배차 범위 6가지(I, IA, IT, IAP, IAT, IATP)를 고려하고, 경로 계획은 최단 거리 경로, 최단 시간 경로(CF 알고리즘 사용)를 사용하여 총 12가지의 조합에 대하여 비교 실험을 수행한다.

그림 7, 그림 8, 그림 9는 각 도착율에 대하여 평균 승객 대기 시간, 차량 공차 이동거리, 차량 총 이동거리를 보여준다. 그래프에서 각 배차 및 경로 계획의 조합은 (배차 범위)-(경로 계획)으로 표기되어 있다. 경로 계획이 최단 거리 경로를 사용한 조합은 STP로 나타내며, 본 연구에서 제시하는 CF 알고리즘이 적용된 최단 시간 경로를 사용한 조합은 CF로 표기한다. I-STP는 0.105 보다 높은 도착율에서 안정 상태에 이르지 못하였다. 최단 시간 경로를 사용하고 Approaching이 배차 범위에 포함된 조합(IA-CF, IAP-CF, IAT-CF, IATP-CF)은 높은 도착율($\lambda=0.115$)에서도 시스템이 안정 상태로 유지되었다.

그림 7을 보면 낮은 도착율에서는 경로 계획 알고리즘보다 어떤 배차 범위를 사용하느냐에 따라 승객의 평균 대기시간이 달라

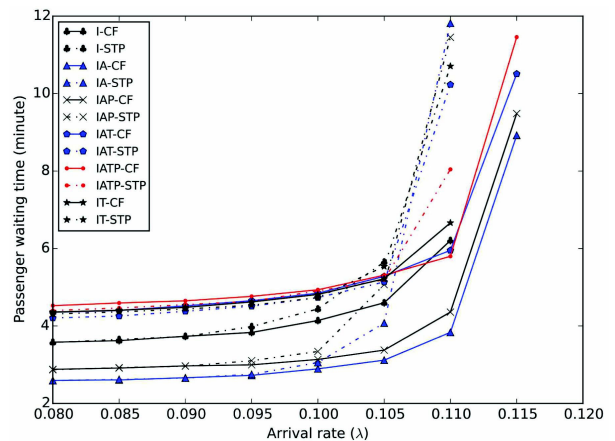


그림 7 평균 승객 대기 시간
Fig. 7 Average passenger waiting time

집을 알 수 있다. 예를 들어, 도착율 0.080과 0.090 사이에서는 최단 거리 경로와 최단 시간 경로 간의 차이를 확인하기 어렵다. 하지만 도착율이 증가함에 따라 본 연구에서 제시한 방법론이 승객의 평균 대기시간관점에서 더 좋은 것을 알 수 있다. 승객의 도착율이 증가함에 따라 주요 선로에는 PRT 차량의 통행이 증가하고 정체 현상이 발생한다. 이때 최단 거리 경로는 고정된 경로를 사용하는 데 반하여 최단 시간 경로는 차량이 우회를 하더라도 정체가 적은 경로를 택하기 때문에 보다 나은 성능지표를 얻을 수 있다. 그리고 그림 7은 배차 범위에 Approaching 상태를 포함하는 경우 배차 규칙이 승객의 탑승 요청에 민감하게 반응하며 그에 따라 승객 대기시간을 단축할 수 있음을 보여준다.

그림 8을 보면, 최단 시간 경로를 사용한 조합은 도착율이 높아질수록 공차 이동거리가 증가함을 알 수 있다. 이는 도착율이 증가함에 따라 정체 구간이 늘어나고, 이에 따라 최단 시간 경로를 사용하는 조합은 해당 지역을 우회하기 때문에 공차 이동거리가 증가하게 된다. STP-I와 STP-IT의 공차 이동거리가 도착율에 따라 증가하는 것은 재배차가 허용되지 않기 때문이다. 그리고 승객이 하차하는 정류장에 대기 중인 승객보다 다른 정류장에 대기 중인 승객의 수가 더 많기 때문이다. 즉, PRT 차량이 서비스를 마친 정류장에서 바로 새로운 승객을 서비스하는 비율보다 공차인 상태로 다른 정류장으로 이동하는 비율이 더 높기 때문이다. 이러한 결과는 표 2에 따라 승객의 출발지와 목적지가 불균등하게 주어졌기 때문이다. 반면, 배차 규칙에 Approaching을 배차 범위에 포함하고, 최단 거리 경로를 사용한 조합은 도착율이 낮을 때는 정류장에 대기 중인 PRT 차량이 많아(Idle 상태) 상대적으로 공차 이동거리가 작았으나, 도착율이 높아지면 공차 이동거리가 줄어든다. 그 이유는 높은 도착율에서 PRT 차량이 서비

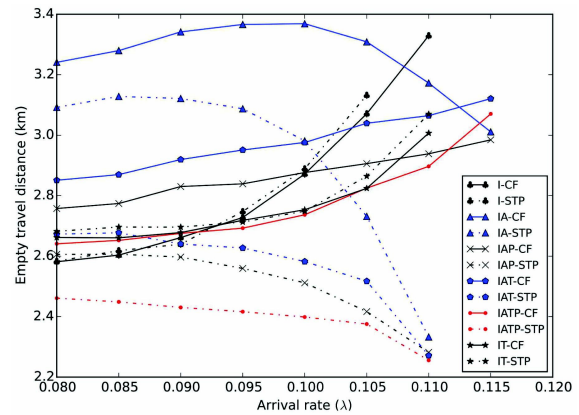


그림 8 평균 공차 이동거리
Fig. 8 Average empty travel distance

스를 마친 정류장에 대기하고 있는 승객이나 해당 정류장 근처에서 대기 중인 승객의 비율이 낮은 도착율에 비하여 높기 때문이다. 따라서 높은 도착율에서는 차량이 공차로 이동하는 비율이 줄어든다. 그리고 Transiting이 배차 범위에 포함된 조합은 공차 이동거리가 대체로 작음을 확인할 수 있다.

그림 9에서 IT-STP와 IT-CF는 도착율과 상관없이 일정한 값을 유지한다. 이는 차량의 기존 배차 계획이 수정되지 않는 상황에서, 하나의 승객 탑승 요청을 처리하기 위하여 PRT 차량이 평균적으로 이동하는 거리가 일정하다는 것을 의미한다. 그리고 해당 조합들은 배차 범위에 Idle 상태만 포함한 조합에 비하여 차량의 총 이동거리가 작다. 그림 8과 그림 9를 비교하면 도착율이 낮을 때 배차 규칙에 Approaching을 포함한 조합이 공차 이동거

표 2 정류장 별 승객 도착 가중치

Table 2 Weight of passenger arrivals for each station

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S3
S1	0.000	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	36.092	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	36.092	36.092
S2	0.009	0.000	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
S3	0.009	0.009	0.000	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
S4	0.009	0.009	0.009	0.000	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
S5	0.009	0.009	0.009	0.009	0.000	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	36.092	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	36.092	36.092
S6	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.000	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
S7	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.000	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
S8	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.000	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
S9	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.000	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
S10	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.000	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
S11	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.000	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
S12	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089	0.000	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089
S13	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089	0.000	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089	13.089
S14	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.000	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
S15	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	36.092	0.009	0.009	0.000	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	36.092	36.092
S16	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.000	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
S17	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.000	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
S18	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.000	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
S19	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.000	0.009	0.009	0.009	0.009
S20	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.000	0.009	0.009	0.009
S21	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	36.092	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.000	36.092	36.092
S22	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.000	0.009
S23	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.000

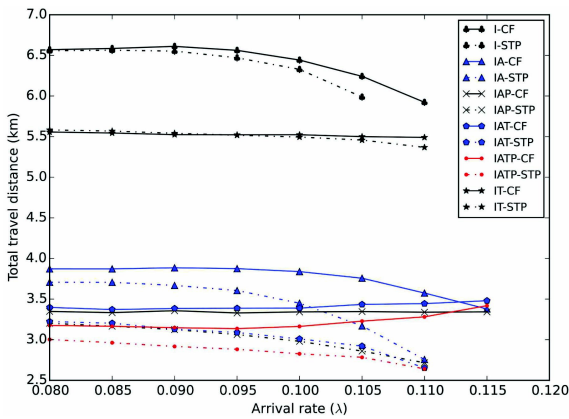


그림 9 평균 총 이동거리
Fig. 9 Average total travel distance

리는 크지만 총 이동거리는 반대로 더 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 재배차 결과에 따라 각 차량에 할당된 승객이 바뀌어 공차 이동은 증가할 수 있으나, 이로 인하여 다른 차량은 공차 이동을 시작하지 않고 정류장에서 Idle 상태로 대기할 가능성이 커지기 때문이다. 즉, Approaching 중인 차량의 공차 이동거리는 증가하더라도 시스템 전체 입장에서는 다른 차량의 공차 이동이 줄어들어 총 이동거리 면에서는 더욱 나은 결과를 보여주는 것으로 판단된다.

그림 10의 산점도(scatter plot)는 일정한 도착율($\lambda=0.110$)에서 총 이동거리와 승객의 대기시간에 대하여 각 배차 범위와 경로 계획 조합의 성능 지표를 보여준다. 서비스 수준과 관련된 승객의 대기시간에 대해서는 평균값, 90th percentile 값, 최대값을 측정하였다. 그림 10에 따르면, 전반적으로 최단 거리 경로를 이용한 조합은 총 이동거리에서 좋은 결과를 보이나, 해당 조합들은 승객 대기시간이 상대적으로 크다. 또한, 정해진 최단 거리

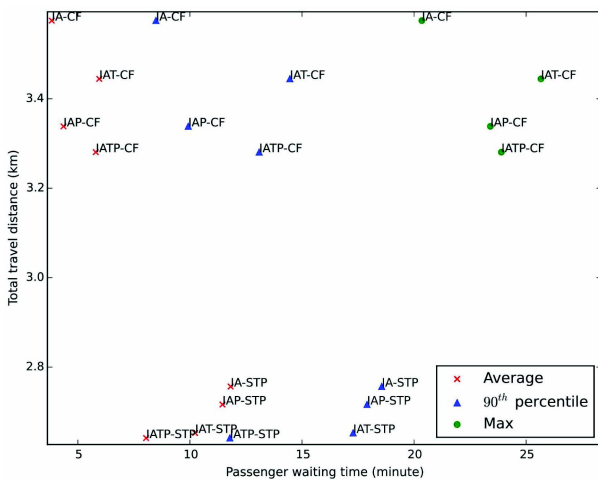


그림 10 평균대기시간과 총이동거리
Fig. 10 Passenger waiting time and total travel distance ($\lambda=0.110$)

로만 차량이 주행하므로 승객 대기시간의 평균값과 최대값의 차이가 큰 것을 확인할 수 있다. 그림 10에 따르면, 승객의 평균 대기시간과 차량의 총 이동거리에 대하여 IA-CF, IAP-CF, IATP-CF, IATP-STP가 Pareto front를 구성하고 있다. 반면에 승객 대기시간의 90th percentile과 총 이동거리를 동시에 고려하는 경우에 IA-CF, IAP-CF, IATP-STP가 Pareto front를 구성한다. 해당 결과는 IATP-CF를 사용할 경우 승객의 대기시간에 대한 편차가 크다는 사실을 확인시켜준다.

5. 결론

본 연구는 PRT 운영 환경에서의 차량 배차 및 경로 계획 문제를 다루었다. 이를 해결하기 위하여 배차와 경로 계획을 함께 고려한 알고리즘을 제시하였다. 최단 시간 경로를 탐색하는 새로운 경로 계획 알고리즘을 제시하여 기존의 연구가 고려하지 못한 점을 보완하였고, 이를 배차 알고리즘과 통합하여 문제를 해결하였다.

본 연구는 시뮬레이션 실험을 통하여 다음과 같은 사실을 확인하였다.

- 승객의 도착율이 낮은 경우, 경로 계획 방법보다는 배차 범위가 성능지표에 더 많은 영향을 준다.
- 승객의 도착율이 높은 경우, 최단 시간 경로를 사용한 알고리즘이 PRT 시스템에서 승객을 효과적으로 서비스할 수 있다.

본 연구에서 제시하는 알고리즘은 다목적(승객의 대기시간-차량의 총 이동거리)에 대한 성능지표에서 우수한 결과를 보여주었다. 구체적으로, 배차 범위에 Transiting 상태가 포함된 경우, 온라인 PRT 배차 및 경로 계획 알고리즘은 공차 이동거리에 대해서 좋은 성능지표를 보여주었다. 그리고 Approaching 상태를 배차 범위에 포함하는 것이 승객의 탑승 요청을 민첩하게 대처하고 승객의 대기시간을 줄일 수 있음을 밝혔다. 또한, 높은 도착율에서 최단 거리 경로를 바탕으로 한 방식이 시스템을 안정화하지 못한 것과 달리, 본 연구에서 제시한 최단 시간 경로를 제시하는 CF 알고리즘은 승객 대기시간에 대하여 더욱 나은 결과를 보여주었다.

본 연구 결과는 유사한 특성을 가지는 다른 환경에도 적용 가능할 것으로 예상된다. 예를 들어 다양한 산업에서 중요한 역할을 담당하고 Automated Guided Vehicle (AGV)의 경우 과거 단순한 배치에 한정된 수의 차량만 운영되는 것이 일반적이었다. 하지만 자동화 수준이 높아짐에 따라 대상 지역과 투입 대수의 규모가 커지고 있다. 따라서 생산성 향상을 위해 보다 효율적인 운영 정책의 개발이 요구되고 있다[21]. 본 연구에서 제안하는 방법론은 이와 같은 AGV의 운영에도 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 생활과 밀접하게 관련된 택시 배차 및 경로 계획 문제에 활용하여 승객 만족도와 에너지 사용 효율을 높일 수 있다.

향후 연구로 서비스가 끝난 차량을 승객의 발생 패턴에 따라 재배치하는 연구가 필요할 것으로 여겨진다. 그리고 PRT 운영

환경에 적합한 주기적인 경로 재탐색의 수행하는 경우 승객 서비스 수준을 보다 향상할 수 있을 것으로 기대된다.

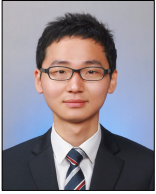
감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] K. Mueller and S. P. Sgouridis, "Simulation-based analysis of personal rapid transit systems: service and energy performance assessment of the Masdar City PRT case", *Journal of advanced transportation*, vol. 45, No. 4, pp. 252-270, 2011.
- [2] UK Tram, "Advice Note for Promoters Considering Personal Rapid Transit (PRT)", 2012
- [3] P. J. Egbelu and J. M. A. Tanchoco, "Characterization of automatic guided vehicle dispatching rules", *International Journal of Production Research*, vol. 22, No. 3, pp. 359-374, 1984.
- [4] S. Lee, "The role of centrality in ambulance dispatching", *Decision Support Systems*, vol. 54, No. 1, pp. 282-291, 2012.
- [5] Ü. Bilge, G. Esenduran, N. Varol, Z. Öztürk, B. Aydın and A. Alp, "Multi-attribute responsive dispatching strategies for automated guided vehicles", *International Journal of Production Economics*, vol. 100, No. 1, pp. 65-75, 2006.
- [6] Y. Ho and H. Liu, "A simulation study on the performance of pickup-dispatching rules for multiple-load AGVs", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 51, No. 3, pp. 445-463, 2006.
- [7] B. Zhicheng, M. Weijian, Y. Xiaoming, Z. Ning and M. Chao, "Modified Hungarian Algorithm for Real-Time ALV Dispatching Problem in Huge Container Terminals", *Journal of Networks*, vol. 9, No. 1, pp. 123-130, 2014.
- [8] A. C. Regan, H. S. Mahmassani and P. Jaillet, "Evaluation of Dynamic Fleet Management System: A Simulation Framework", *Transportation Research Board*, 1998.
- [9] B. Kim, J. Shin, S. Jeong and J. Koo, "Effective overhead hoist transport dispatching based on the Hungarian algorithm for a large semiconductor FAB", *International Journal of Production Research*, vol. 47, No. 10, pp. 2823-2834, 2009.
- [10] P. K. Sheridan, E. Gluck, Q. Guan, T. Pickles, B. Balcioglu and B. Benhabib, "The dynamic nearest neighbor policy for the multi-vehicle pick-up and delivery problem", *Transportation Research Part A* vol. 49, pp. 178-194, 2013.
- [11] C. Han, B. Kwon, B. Kim, R. Jeong, H. Lee and B. Ha, "An Online Personal Rapid Transit Dispatching Algorithm Based on Nearest Neighbor Dispatching Rule", *Journal of the Korean Society for Simulation*, vol. 23, No. 4, pp. 97-109, 2014.
- [12] K. Bartlett, J. Lee, S. Ahmed, G. Nemhauser, J. Sokol and B. Na, "Congestion-aware dynamic routing in automated material handling systems", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 70, pp. 176-182, 2014.
- [13] B. R. Sarker and S. S. Gurav, "Route planning for automated guided vehicles in a manufacturing facility." *International Journal of Production Research*, vol. 43, No. 21, pp. 4659-4683, 2005.
- [14] C. Kim and J. M. A. Tanchoco, "Conflict-free shortest-time bidirectional AGV routeing", *International Journal of Production Research*, vol. 29, No. 12, pp. 2377-2391, 1991.
- [15] R. H. Möhring, E. Köhler, E. Gawrilow and B. Stenzel, "Conflict-free real-time AGV routing", *Operations Research Proceedings*, 2004.
- [16] N. Smolic-Rocak, S. Bogdan, Z. Kovacic and T. Petrovic, "Time Windows Based Dynamic Routing in Multi-AGV Systems", *Automation Science and Engineering*, *IEEE Transactions on*, vol. 7, No. 1, pp. 151-155, 2010.
- [17] S. Rajotia, K. Shanker and J. L. Batra, "A semi-dynamic time window constrained routeing strategy in an AGV system", *International Journal of Production Research*, vol. 36, No. 1, pp. 35-50, 1998.
- [18] C. Oboth, R. Batta and M. Karwan, "Dynamic conflict-free routing of automated guided vehicles", *International Journal of Production Research*, vol. 37, No. 9, pp. 2003-2030, 1999.
- [19] Y. Tanaka, T. Nishi, and M. Inuiguchi, "Dynamic Optimization of Simultaneous Dispatching and Conflict-free Routing for Automated Guided Vehicles", *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vo. 4, No. 3, pp. 701-715, 2010.
- [20] T. Nishi, Y. Hiranaka and I. E. Grossmann, "A bilevel decomposition algorithm for simultaneous production scheduling and conflict-free routing for automated guided vehicles", *Computers & Operations Research*, vol. 38, No. 5, pp. 876-888, 2011.
- [21] I. F. A. Vis, "Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems", *European*

저 자 소 개



한 충 균 (Chung-Kyun Han)

2013년 부산대학교 산업공학과 (학사)
2015년 부산대학교 산업공학과 (석사)
관심분야 : 시설물류, 시뮬레이션



김 백 현 (Baek-Hyun Kim)

1994년 인하대학교 전자공학과 (학사)
1996년 인하대학교 전자공학과 (석사)
2003년 인하대학교 전자공학과 (박사)
2003년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원
관심분야 : 전자통신, 열차제어 시뮬레이션



정 락 교 (Rag-Gyo Jeong)

1991년 인하대학교 전기공학과 (학사)
1999년 인하대학교 전기공학과 (석사)
2005년 인하대학교 전기공학과 (박사)
1990년~1994년 한진중공업 사원
1995년~현재 한국철도기술연구원 책임연구원
관심분야 : 전기전자, 열차급전 시뮬레이션



하 병 현 (Byung-Hyun Ha)

1998년 서울대학교 산업공학과 (학사)
2005년 서울대학교 산업공학과 (박사)
2005년~2006년 (주)사이버메드 연구소장
2006년~현재 부산대학교 산업공학과 부교수
관심분야 : 물류 최적화, 시뮬레이션, 지식
공학, 의료 영상