

# 최근린 배차 규칙 기반 온라인 Personal Rapid Transit 배차 알고리즘

한충균 · 권보배 · 김백현 · 정락교 · 이 훈 · 하병현\*

## An Online Personal Rapid Transit Dispatching Algorithm Based on Nearest Neighbor Dispatching Rule

Chung-Kyun Han · Bo Bea Kwon · Baek-Hyun Kim · Rag-Gyo Jeong · Hoon Lee · Byung-Hyun Ha\*

### ABSTRACT

Personal rapid transit (PRT) is a new transportation system, which is energy efficient and brings high quality of customer service. Customers arrive dynamically at stations and request transportation service. In this paper, we propose a new online PRT dispatching algorithm for pickup and delivery of customers. We adopt the nearest neighbor dispatching rule, which is known as performing well in general. We extend the rule with bipartite matching in order to deal with multiple vehicles and customers at the same time. We suggest a systematic way for selecting vehicles that will be considered to be dispatched, since the scope with which vehicles are selected may affect the system performance. We regard the empty travel distance of vehicles and the customer waiting time as the performance measures. By using simulation experiments, it has been examined that the scope of dispatching affects the system performance. The proposed algorithm has been validated by comparing with other dispatching rules for transportation services. We have shown that our algorithm is more suitable for PRT operating environment than other dispatching rules.

**Key words** : Personal rapid transit (PRT), Dynamic pickup and delivery, Online algorithm, Vehicle dispatching, Nearest neighbor dispatching rule

### 요 약

Personal Rapid Transit (PRT)는 차세대 대중교통 수단으로 에너지 효율적이며 높은 수준의 고객 서비스를 제공한다. 정류장에 동적으로 도착한 고객이 운송 서비스를 요청하면 PRT 시스템은 차량을 배차한다. 본 연구에서는 PRT 시스템을 위한 새로운 온라인 배차 알고리즘을 제시하였다. 제시된 알고리즘은 최근린(nearest neighbor) 배차 규칙을 기반으로 개발되었으며, 이분 매칭(bipartite matching)을 사용하여 다수의 PRT 차량과 고객을 동시에 고려하여 배차를 결정한다. 이 경우 전체 차량 중 배차 대상 차량의 선택 범위가 성능지표에 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 연구에서는 차량의 상태를 고려하여 체계적으로 배차 차량을 선택하는 방법을 제시한다. 성능지표로 공차 이동거리와 고객 대기시간을 고려하였으며, 시물레이션 기법을 사용하여 배차 선택 범위에 따른 성능지표의 차이를 확인하였다. 그리고 기존의 배차 규칙과 비교하여 본 연구에서 제시하는 방법이 우수하며 PRT 시스템에 적합한 것을 확인하였다.

**주요어** : Personal rapid transit (PRT), 동적 수송, 온라인 알고리즘, 차량 배차, 최근린 배차 규칙

## 1. 서 론

\*본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업(과제번호 PK14006)의 지원으로 수행되었습니다.

**Received:** 30 June 2014, **Revised:** 18 September 2014,  
**Accepted:** 7 October 2014

\*Corresponding Author: Byung-Hyun Ha  
E-mail: bhha@pusan.ac.kr  
Pusan National University

환경에 대한 관심과 유가의 상승으로 인하여 대중교통에 대한 관심은 날로 증가하고 있다. 지하철과 버스는 대표적인 대중교통 수단으로 다수의 고객을 한꺼번에 운송한다. 따라서 에너지 사용 효율이 높다. 하지만 고객이 편리하게 출발지에서 목적지까지 한 번에 이동하기 어렵다.

그에 반하여, 택시는 무정차 운행이 가능하지만, 비용과 환경적인 측면에서 단점이 있다. 이러한 상황에서 Personal Rapid Transit (PRT)은 새로운 대중교통 시스템으로 주목받고 있다.

PRT 차량은 4~6명의 고객이 탑승 가능한 소형 무인 궤도 차량이며 전용 선로로 이루어진 네트워크에서 운행된다. 또한, 택시와 유사하게 door-to-door 서비스를 제공한다. 그 외 PRT의 특징은 다음과 같다<sup>[14]</sup>.

- PRT 차량은 작고 가벼우며 수요 대응형 서비스를 제공한다. 따라서 비교적 저렴한 비용으로 운영할 수 있다.
- 기본적으로 합승 서비스를 제공하지 않는다. 그러므로 개인 공간을 보장받을 수 있다.
- 주선로와 승강장 진입 선로가 분리되어 있기 때문에 주행 중인 PRT 차량이 정차 없이 정류장을 통과할 수 있다.
- 네트워크 상에 있는 차량의 위치와 고객 대기 현황에 대한 정보를 수집한다. 이러한 정보를 통하여 교통 혼잡을 예상하고 차량의 운행경로를 통제한다.
- 공차를 적절하게 정류장에 배치하여 고객이 정류장에서 기다리는 시간을 최소화시킬 수 있다.

PRT는 영국의 히스로공항과 아랍에미리트의 마스다르시티에서 운행 중이며, 국내에서는 2013년 순천만 국제정원박람회에서 시험 운행되었다. 그리고 현재도 PRT 시스템과 관련하여 다양한 프로젝트가 계획 및 진행 중이다.

PRT 시스템에서 차량을 고객에게 배차하는 것은 동적 수송 문제(dynamic pickup and delivery problem)로 볼 수 있다. Berbeglia 등<sup>[11]</sup>은 동적 수송 문제에 대한 해결 전략을 크게 두 가지로 분류하였다. 첫 번째는 새로운 정보를 일정 시간 동안 모아 정적인 문제로 풀이하는 전략이다. 두 번째 전략은 새로운 정보가 시스템에 들어올 때마다 현재의 해를 업데이트하는 것이다.

첫 번째 전략에서는 대표적으로 수리 계획 모형을 사용하는 방법론이 있다<sup>[4, 5, 8, 9]</sup>. 네트워크 흐름(network flow), 열 생성(column generation) 등 구체적인 해결 방법에는 차이가 있으나 수리 계획 모형을 기본으로 한다. 이들 대부분의 연구는 의사 결정 순간마다 해를 도출한다. 하지만 동적으로 변하는 환경을 고려하면 최적을 보장하지 못할 수 있다. 그리고 해를 찾는 데 상당한 시간이 소요되는 단점이 있다. 동적 수송 문제에서는 짧은 시간 내에 어떤 차량이 어떤 작업을 처리할지 결정하는 것이 중요하다. 따라서 일반적으로 동적 수송 문제에서는 수리 계획 모형보다 휴리스틱 방법론을 사용하는 것이 선호된다.

두 번째 전략에서 사용되는 대표적인 방법론은 배차 규칙이다<sup>[2, 6, 10, 11, 12, 13, 15]</sup>. Egbelu 와 Tanchoco<sup>[6]</sup>, Ho 와 Liu<sup>[10]</sup>는 시뮬레이션 실험을 통하여 무인운반차(automated guided vehicle; AGV)를 위한 다양한 배차 규칙의 생산성을 비교하였다. 그리고 Bilge 등<sup>[2]</sup>은 작업장 간의 거리와 작업장 대기열의 길이를 고려한 배차 규칙을 제시하였고, Lee<sup>[11]</sup> 또한 응답시간과 집중성(centrality)을 고려한 배차 규칙으로 재난 상황에서의 구급차 배차 문제를 해결하였다.

동적 수송 문제에서 재배차(re-dispatching) 또는 확정된 배차 계획의 수정을 허용하는 경우 의사결정은 보다 어려워진다. 하지만 수정된 배차 계획은 보다 바람직한 결과를 제시할 수 있다. Regan 등<sup>[12]</sup>은 동적 차량 관리 시스템에서 재배차 고려 유무에 따른 운송 기업의 수익 변화를 시뮬레이션 실험을 통하여 보여주었다. Sheridan 등<sup>[13]</sup>은 최근린(nearest neighbor; NN) 배차 규칙에 재배차 개념을 도입한 동적 최근린(dynamic nearest neighbor; DNN) 배차 규칙을 제시하였다. 그리고 고객 발생률과 발생지역이 시간에 따라 달라지는 상황에서 DNN이 NN보다 평균 주행 시간과 고객의 평균 시스템 시간을 줄일 수 있음을 보였다.

AGV는 기존의 운송 수단 중 PRT 차량과 운영 방식이 유사하다. 하지만 PRT와 비교하여 다음과 같은 차이가 존재한다. 먼저, AGV 배차와 관련된 연구는<sup>[2, 3, 5, 6, 7, 10, 15]</sup> 대부분 생산성과 대기 행렬의 길이 또는 재공품(work-in-process)의 수량 등을 주요 성능지표로 한다. 반면 PRT 시스템은 생산성뿐 아니라 고객 서비스 수준 또한 주요한 성능지표로 고려해야 한다. 다음으로, AGV의 경우 일반적으로 제한된 크기의 작업장을 대상으로 하며 상대적으로 소수의 차량이 어느 정도 예측 가능한 작업을 처리하는데 반해, PRT는 복잡한 네트워크 상에서 많은 수의 동적인 고객의 배차 요청을 처리한다. 따라서 기존의 AGV 배차 연구를 PRT 시스템에 그대로 적용하는 것에는 한계가 있다.

본 연구에서는 기존의 배차 규칙 중 효과적이라고 알려진 NN 규칙을 확장하여 PRT 시스템에 적합한 새로운 배차 규칙을 제시한다. 다수의 PRT 차량과 다수 고객의 탑승 요청을 함께 고려하기 위하여 이분 매칭(bipartite matching) 방법을 사용한다. 이를 위해 차량의 상태를 모델링 하여 배차 대상이 되는 차량을 체계적으로 선택하는 방안을 제시한다. 성능지표는 환경적 요소와 고객 서비스 수준을 고려하여 공차 이동거리(empty travel distance)와 고객 대기시간(customer waiting time)으로 한다. 시뮬레

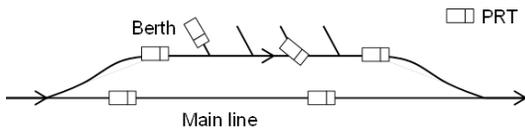


Fig. 1. Station layout

이선 기법을 사용하여 각 배차 대상 차량의 선택에 따른 성능지표의 차이를 확인하였으며, 기존의 배차 규칙과 비교하여 본 연구에서 제시하는 방법론이 보다 우수함을 보인다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2장에서 온라인 PRT 차량 배차 문제를 설명하고, 3장에서 온라인 배차 규칙을 제시한다. 그리고 4장에서 시뮬레이션을 통하여 배차 규칙을 비교 및 분석한다. 마지막으로 5장에서 결론 및 추후 연구를 제시한다.

## 2. 문제정의

### 2.1 PRT 시스템 환경 및 가정 사항

PRT 시스템의 네트워크는 정류장(station)과 선로로 구성된다. 선로 위에서 PRT 차량은 단 방향으로 주행한다. 곡선 구간 또는 정류장의 진출입 구간에서 최고 주행 속도는 제한된다. 정류장은 Fig. 1과 같이 주선로(main line), 승차장(berth)으로 구분된다. 승차장은 고객이 PRT 차량을 탑승하거나 하차하는 장소이다. 정류장에는 한정된 수의 승차장이 존재하며 모든 승차장에 차량이 정차중인 경우, 나중에 도착한 차량은 승차장이 빌 때까지 기다린다. 그리고 해당 정류장이 목적지가 아닌 차량은 주선로를 통하여 정류장을 통과한다.

PRT 시스템의 네트워크는 단일 방향의 선로로 이루어진 순환형(circular-layout) 네트워크이다. 본 연구에서는 차량 간의 간섭을 고려하지 않으며, PRT 차량의 주행경로는 항상 최단 경로를 사용한다고 가정한다. 이는 순환형 네트워크에서 PRT 차량의 에너지 사용 효율을 높이고 고객을 빠른 시간에 서비스하기 위함이다. 추가적인 가정 사항은 다음과 같다.

- 계획기간 동안 PRT 차량의 수는 일정하고 PRT 차량의 종류는 동일하다.
- PRT 차량은 구간별로 정해진 최대 속도로 주행한다.
- 서비스를 요청한 고객은 PRT 차량이 도착할 때까지 정류장을 떠나지 않는다.
- 고객의 승차 희망 시간과 도착 희망 시간은 고려하

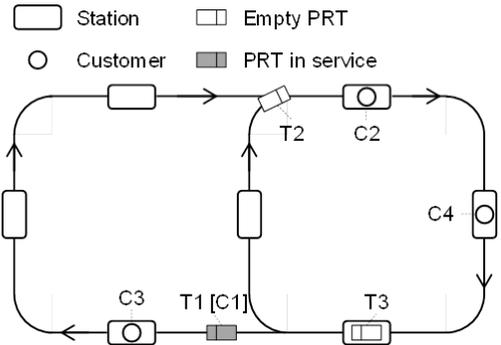


Fig. 2. Example of PRT vehicles and customers

지 않는다.

- 고객은 PRT 차량에 탑승한 후 자신의 목적지를 입력한다.
- 합승 및 환승은 없다.
- 동일 정류장에서 먼저 도착한 고객의 우선순위는 나중에 도착한 고객보다 높다.

본 연구는 공차 이동거리와 고객 대기시간을 바탕으로 알고리즘의 성능을 측정한다. 이는 공차 이동거리가 에너지 사용 효율을 검증하는데 사용될 수 있으며, 고객 대기 시간은 고객 서비스 수준을 평가하는데 사용될 수 있기 때문이다.

### 2.2 NN 배차 규칙의 확장

기존 NN 배차 규칙은 기본적으로 하나의 작업 또는 한 대의 차량에 대한 배차 방법이다. 즉, 새로운 작업이 발생하면 가장 가까운 차량이 해당 작업을 수행하며, 작업을 마친 차량은 가장 가까운 대기 작업을 처리한다. 예를 들어 Fig. 2의 예제를 고려하자. 이 예제의 상황은 다음과 같다.

- PRT T1에는 고객 C1이 탑승 중이다.
- T1의 목적지는 C3이 대기 중인 정류장이다.
- T2는 C2를 태우러 가는 중이다.
- T3은 정류장에서 대기 중이다.
- C3이 방금 도착하였다.

이 경우 NN 배차 규칙을 적용하면 새로 도착한 C3을 위해 가장 가까운 T3이 배차된다.

본 연구에서는 여러 대의 차량과 다수의 고객을 동시에 고려하여 배차를 수행한다. 또한 재배차도 허용하는 알고리즘을 개발한다. 이 경우 보다 효율적인 의사결정이 가능하다. 예를 들어 Fig. 2에서 T1에 탑승 중인 고객이 C3이 대기 중인 정류장에서 내릴 예정이므로 T1이 T3보

다 먼저 C3을 서비스 할 수 있다. 따라서 T1을 C3에 배차하는 것이 나은 의사결정이다. 또한 C4도 함께 고려한다면, T2를 C4에게 재배차하고(기존은 T2가 C2에 배차되어있었음) T3을 C2로 배차하여 공차 이동거리와 함께 대기시간도 줄일 수 있다. 하지만 NN 배차 규칙을 사용하는 경우 이와 같은 운영은 불가능하다.

본 연구는 이를 위해 이분 매칭 방법을 사용한다. 이분 매칭은 제한된 자원과 작업을 총비용 또는 총이익을 고려하여 짝짓는 방법으로, 차량 배차 문제에서 자주 활용된다<sup>3, 12, 15</sup>. 이를 온라인 PRT 배차 문제에 적용하면, 고객의 탑승요청에 대하여 PRT 차량을 할당하는 것으로 볼 수 있다.

본 연구에서 매칭 비용은 고객 승차까지의 소요 시간으로 한다. 즉, 빈 차량의 경우 현재 위치에서 고객이 도착한 정류장까지 이동하는데 걸리는 시간으로 계산되며, 고객이 탑승하고 있는 차량의 경우 탑승 중인 고객에 대한 서비스를 마친 후 해당 고객이 기다리는 정류장까지 이동하는데 걸리는 시간으로 한다. 전체 비용을 최소화하는 최적 이분 매칭 결과는 Hungarian method를 사용하여 도출하였다.

전체 PRT 차량 중 어떤 차량을 배차 대상으로 고려하느냐에 따라 성능이 달라질 수 있다. 진술된 예에서는 모든 차량을 배차 대상으로 포함하였다. 하지만, 예를 들어, 배차 대상을 T2와 T3으로 제한하면 다른 결과가 도출될 수 있다. 3절에서 배차 대상을 체계적으로 선택하는 방안을 제시한다.

### 3. 온라인 PRT 배차 알고리즘

#### 3.1 알고리즘 수행 절차

본 연구에서 제시하는 알고리즘은 다음과 같은 시점마다 PRT 차량을 배차한다.

- 새로운 고객이 정류장에 도착할 때
- PRT 차량이 탑승 중인 고객에 대한 서비스를 마칠 때 Confessore 등<sup>5</sup>의 정의에 따르면 첫 번째는 machine-initiated dispatching이며 두 번째는 vehicle-initiated dispatching으로 볼 수 있다. 구체적으로 온라인 PRT 배차를 수행하는 단계는 다음과 같다.

**Step 1. 배차 대상 PRT 차량과 후보 고객의 선택:** 전체 PRT 차량 중 배차 대상 차량과 모든 대기 고객 중 차량 배차가 필요한 후보 고객을 선택한다.

**Step 2. PRT 차량과 고객 간의 비용 계산:** 차량과 고객의 상태와 위치를 바탕으로 매칭 비용을 계산한다.

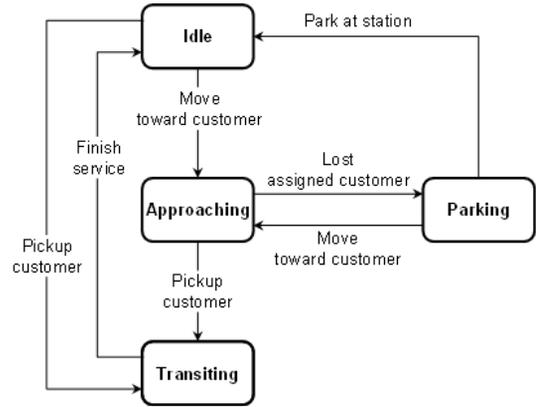


Fig. 3. PRT state transition diagram

Table 1. Description of PRT vehicle states

State	Description
Idle	A vehicle stays at a station without customer assignment.
Approaching	A vehicle is moving toward a customer.
Transiting	A vehicle is transporting a customer.
Parking	A vehicle is moving toward the nearest station without customer assignment.

**Step 3. 임시 배차 계획 생성:** 이분 매칭 문제를 풀이하여 고객이 대기하고 있는 각 정류장에 대한 PRT 차량의 임시 배차 계획을 도출한다.

**Step 4. 고객 우선순위를 고려한 최종 배차 계획 도출:** 동일한 정류장에서 대기 중인 고객이 도착한 순서로 서비스를 받을 수 있는 최종 배차 계획을 도출한다.

참고로 Step 3에서 고객이 아닌 정류장으로 PRT 차량을 배차하는 이유는 동일한 정류장에서 기다리는 고객의 우선순위를 고려하기 위함이다(Step 4 참고).

본 연구에서는 PRT 차량의 운행 상태를 모델링 하여 차량의 배차 범위를 정의한다. PRT 차량의 운행 상태는 Fig. 3과 같이 Idle, Approaching, Transiting 및 Parking 상태로 구분한다. 각 운행 상태에 대한 설명은 Table 1과 같다.

Idle 상태인 PRT 차량이 고객에게 배차되면 Approaching 상태로 바뀐다. 그리고 고객이 탑승한 후 Transiting 상태로 전환된다. 차량이 정차 중인 정류장에서 고객의 탑승요청이 발생하는 경우, 차량은 Idle 상태에서 Approaching 상태를 거치지 않고 Transiting 상태로 바로 전환된다. 서

**Table 2.** Scope of PRTs to be dispatched

Notation	PRTs with Specific States			
	I	A	T	P
$R^I$	O			
$R^{IA}$	O	O		
$R^{IT}$	O		O	
$R^{IAP}$	O	O		O
$R^{IAT}$	O	O	O	
$R^{IATP}$	O	O	O	O

비스를 끝낸 차량의 상태는 Transiting에서 Idle로 변한다. 또한 배차 결과에 따라 Approaching 상태의 차량이 더 이상 고객을 태우기 위하여 이동할 필요가 없어질 경우, Parking 상태로 변하고 가까운 정류장으로 이동한다.

본 연구는 배차 범위를 지정하여 배차의 대상이 되는 차량을 한정한다. 배차 범위는 PRT 차량의 상태에 따라 배차 대상을 선택하는 기준이다. 총 4개의 차량 상태 중 Idle 상태는 배차 범위에 항상 포함된다. Table 2는 배차 범위와 각각에 속하는 차량 상태의 조합을 보여준다. 각 배차 범위에 속하는 상태는 R의 위첨자로 표시되어 있다. 예를 들어  $R^{IAP}$ 는 전체 차량들 중 Idle, Approaching, Parking 상태의 차량을 배차 대상으로 하는 것을 의미한다. 참고로  $R^I$ 는 재배차를 고려하지 않는 NN 배차 방법과 동일하다.

배차 범위에 Approaching 상태가 포함되면( $R^{IA}$ ,  $R^{IAP}$ ,  $R^{IAT}$ ,  $R^{IATP}$ ), 다음과 같은 특징이 있다. 첫째, 기존 배차 계획이 수정될 수 있다. 즉, 새로운 고객의 탑승 요청에 따라 다른 고객을 태우기 위하여 이동 중이던 차량의 배차 계획이 바뀔 수 있다. 반면, Approaching 상태가 배차 범위에 포함되지 않는다면( $R^I$ ,  $R^{IT}$ ), 기존의 배차 계획은 수정될 수 없다. 이는 Approaching 상태가 포함된 배차 범위에서만 Parking 상태의 차량이 나타날 수 있음을 의미한다. 따라서 본 연구는  $R^{IP}$ 와  $R^{ITP}$  조합은 고려하지 않는다.

둘째로, Approaching 상태가 배차 범위에 포함되어 있는 경우, 모든 고객이 차량 배차가 필요한 후보 고객이 된다. 그렇지 않은 경우, 전체 고객 중 차량이 배차되지 않은 고객만 후보 고객으로 고려된다. 이를 위하여 고객의 상태를 정의하고 A와 U를 사용하여 나타낸다. A와 U는 배차된 차량이 있는 것(assigned) 없는 것(unsigned)의 의미한다.

알고리즘 성능지표와 관련하여 Approaching 또는

Transiting 상태가 포함된 배차 범위는 다음과 같은 특징이 있다.

- Approaching 상태 포함: 기존의 배차 계획이 수정될 수 있기에 고객의 탑승 요청에 민감하게 반응한다. 따라서 고객 대기시간을 단축할 수 있다.
- Transiting 상태 포함: 서비스 중인 고객의 목적지를 고려하여 PRT 차량을 대기 중인 고객에게 배차한다. 따라서 공차 이동거리를 줄일 수 있다.

구체적으로 본 연구에서 제시하는 알고리즘의 입력은 아래와 같다. 여기서 차량의 상태는 I (Idle), A (Approaching), T (Transiting), P (Parking)로 나타내고, 고객의 상태는 A (Assigned), U (Unassigned)로 표기한다.

- $N$ : 모든 정류장의 집합
- $T(x,y)$ : 위치  $x$ 에서 위치  $y$ 까지의 이동 소요시간
- $S$ : 배차 범위;  $S \subseteq \{I, A, T, P\}$
- $C^0$ : 모든 대기 고객의 집합
- $I^0$ : 모든 PRT 차량의 집합
- $u_j$ : 고객  $j$ 의 상태;  $u_j \in \{A, U\}$
- $r_j$ : 고객  $j$ 가 정류장에 도착한 시간
- $O_j$ : 고객  $j$ 가 도착한 정류장
- $D_j$ : 고객  $j$ 의 목적 정류장
- $s_i$ : 차량  $i$ 의 상태;  $s_i \in \{I, A, T, P\}$
- $p_i$ : 차량  $i$ 의 위치
- $c(i)$ : 차량  $i$ 가 서비스 중인 고객

알고리즘 내에서 사용되는 표기는 다음과 같다. 여기서 최종 배차 계획  $P$ 가 알고리즘의 출력이다.

- $V$ : 배차 대상 차량의 집합
- $C_k$ : 정류장  $k \in N$ 에 대기 중인 배차 후보 고객들의 집합
- $C$ : 모든 배차 후보 고객의 집합
- $m_j$ : 차량  $i$ 가 고객  $j$ 가 대기 중인 정류장까지 도달하는데 걸리는 시간
- $A$ : 임시 배차 계획;  $(i,j) \in A \Leftrightarrow$  차량  $i$ 가 고객  $j$ 에 임시 배차됨
- $V_k$ : 정류장  $k \in N$ 에 배차된 차량의 집합
- $P$ : 최종 배차 계획;  $(i,j) \in P \Leftrightarrow$  차량  $i$ 가 고객  $j$ 에 배차됨

배차 알고리즘은 다음과 같다.

```
function Dispatch()
// Step 1
```

**Set**  $V = \{i \in V^0 \mid s_i \in S\}$   
**Set**  
 $C_k = \begin{cases} \{j \in C^0 \mid O_j = k\} & \text{if } \mathbf{A} \in S \\ \{j \in C^0 \mid u_j = U \text{ and } O_j = k\} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall k \in N$   
**Set**  $C = \cup_{k \in N} C_k$   
**// Step 2**  
**Set**  $m_{ij} = \begin{cases} T(p_i, D_{d(i)}) + T(D_{d(i)}, O_j) & \text{if } s_i = \mathbf{T} \\ T(p_i, O_j) & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall i \in V \text{ and } \forall j \in C$   
**// Step 3**  
**Set**  $A = \text{Hungarian}(C, V, m_{ij})$   
**// Step 4**  
**Set**  $P = \emptyset$   
**Set**  $V_k = \{i \in V \mid \exists j, (i, j) \in A \text{ and } O_j = k\} \quad \forall k \in N$   
**for each station**  $k \in N$   
**while**  $V_k$  **is not empty**  
**Set**  $j^* = \text{argmin}_{j \in C_k} r_j$   
**Set**  $i^* = \text{argmin}_{i \in V_k} m_{ij^*}$   
**Update**  $P \leftarrow P \cup \{(i^*, j^*)\}$   
**Replace**  $C_k \leftarrow C_k \setminus \{j^*\}$   
**Replace**  $V_k \leftarrow V_k \setminus \{i^*\}$

여기서  $\text{Hungarian}(C, V, m_{ij})$ 은 주어진 할당 비용을 바탕으로 최적 이분 매칭을 도출하는 함수이다. 후보 고객과 배차 대상 차량의 수가 다른 경우 가상(dummy) 차량 또는 고객을 추가하여 계산된다.

### 3.2 배차 예제

구체적인 배차 예시를 위해서 Fig. 4에서 주어진 상황

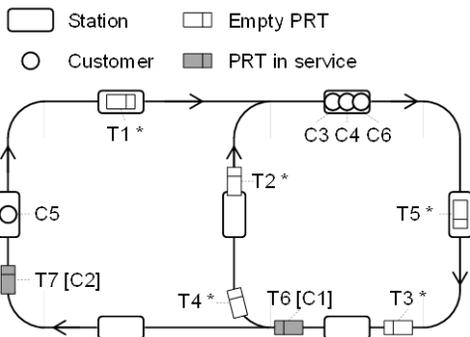


Fig. 4. Example of PRT dispatching

을 고려한다. Fig. 4의 표시 형식은 Fig. 2와 동일하며 고객명은 정류장에 도착한 순서대로 부여되어 있다. 추가로 고객 C2가 탑승한 PRT T7의 목적지는 C5가 있는 정류장이며, C1이 탑승한 T6의 목적지는 C3이 있는 정류장이다.

#### ■ 배차 범위 $R^{IA}$ 를 사용한 배차

- Step 1: Fig. 4에서 \*로 표시된 차량이 배차 대상이며, A가 배차 범위에 포함되어 있으므로 모든 대기 고객이 후보가 된다.
- Step 2: Table 3과 같이 매칭 비용이 계산된다. 참고로 C3, C4, C6은 모두 같은 정류장에서 대기하므로 비용이 모두 동일하다.
- Step 3: Table 3에서 음영으로 표시된 임시 배차 계획이 수립된다.
- Step 4: C4에게는 T1이, C3에게는 T2가, C5에게는 T3이, C6에게는 T4가 배차된다. 이 결과는 Table 3에 \*로 표시되어 있다.

#### ■ 배차 범위 $R^{IAT}$ 를 사용한 배차

- Step 1: 모든 차량이 배차 대상이며, 모든 대기 고객이 후보가 된다.
- Step 2: Table 4과 같이 매칭 비용이 계산된다.
- Step 3: Table 4에서 음영으로 표시된 임시 배차 계획이 수립된다.

Table 3. Assignment table and results of  $R^{IA}$

	C3	C4	C5	C6
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

Table 4. Assignment table and results  $R^{IAT}$

	C3	C4	C5	C6
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
T6	35	35	115	35
T7	45	45	5*	45

- Step 4: C4에게는 T1이, C3에게는 T2가, C6에게는 T4가, C5에게는 T7이 배차된다. 이 결과는 Table 4에 \*로 표시되어 있다.

이전 R<sup>IA</sup> 예제의 배차 결과와 비교하면 T3 대신 T7이 C5에 배차됨을 알 수 있다. 이에 따라 C5의 예상 대기시간이 45에서 5로 줄어든다.

### ■ DNN을 사용한 배차

DNN은 NN을 기본으로 하는 배차 규칙으로 아래의 두 조건을 항상 만족하는 방식으로 배차를 수행한다<sup>[13]</sup>.

- 고객이 서비스를 요청하면 가장 가까운 차량이 배차되며, 배차된 차량 입장에서도 그 고객이 가장 가까운 고객이다.
- 서비스가 끝난 차량은 가장 가까운 고객에게 배차되며, 그 고객 입장에서도 배차된 차량이 가장 가까운 차량이다.

Fig. 4의 예제에서 DNN을 적용하면, T2와 T3은 각각 가장 가까운 C3과 C5에 배차된다. 그리고 C4와 C6에 대한 배차는 C3이 T2에 탑승한 후로 연기된다. 즉, DNN은 같은 정류장에 다수의 고객이 대기 중인 경우 가장 일찍 도착한 고객에게만 차량이 배차된다. 이는 불확실한 환경을 고려하여 의사 결정을 늦추는 결과를 가져오며, 다음 절의 실험에서 확인할 수 있듯이 차량의 공차 이동거리를 단축시킬 수 있다.

## 4. 시뮬레이션 실험

### 4.1 입력

Fig. 5는 본 연구에서 개발한 가상 네트워크에서의 시뮬레이션 실험 환경을 보여준다. 실험은 국내 특정 도시를 바탕으로 구축된 가상 네트워크에서 진행하였다. 총 17개의 정류장이 있으며, 각 정류장에는 4개의 승차장이 존재한다. 해당 네트워크에서 운영되는 PRT 차량의 수는 50대이다. PRT 차량은 직선 구간에서 12m/s로, 정류장 진출입 구간에서 6m/s로, 곡선 구간에서 9m/s로 주행한다. 고객의 탑승 요청은 포아송 과정(poisson process)을 따라 발생하고 도착률(arrival rate)은  $\lambda$ (명/초)로 주어진다. 고객의 출발지와 목적지는 임의로 결정되며, 고객이 승하차하는 시간은 10~60초 사이의 균등 분포(uniform distribution)를 따른다.

임의의 고객 5,000명에 대해 실험을 수행하였으며, 도착률  $\lambda$ 는 0.05부터 0.13까지 0.005의 간격을 사용하였다. 각 도착률에 대하여 20번 반복 실험을 수행하였다. 실험 결과는 1,000명 이후 도착하는 고객들에 대한 통계치를 수집하여 안정화된 성능지표를 구했다. 고객의 평균 대기 시간이 지속적으로 증가하여 시스템이 안정 상태에 이르지 못하는 경우 분석에서 제외하였다.

비교 대상으로 고려하는 기존의 배차 규칙은 FCFS(First Come First Served), FOFO(First Out First On), NN, 그리고 Sheridan 등<sup>[13]</sup>에서 제시된 DNN이다. 이들 중 DNN

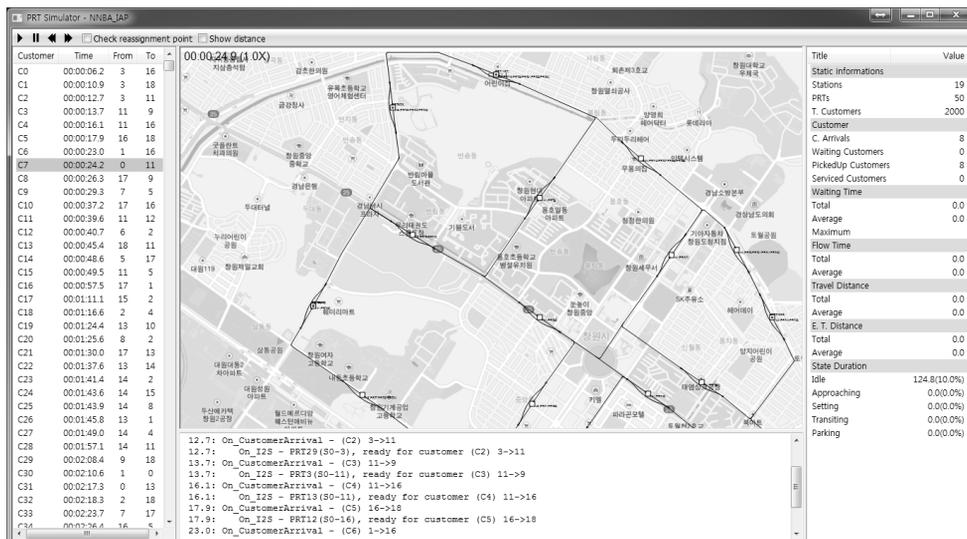


Fig. 5. PRT dispatching & routing simulator

을 제외한 FCFS, FOFO, NN은 재배차를 고려하지 않는 규칙이다.

FCFS는 고객이 도착한 순서대로 PRT 차량이 고객을 서비스한다. FOFO는 PRT 차량이 서비스를 끝낼 때마다 정류장에 대기하는 고객 중 공차 이동시간과 고객 이송 시간의 합이 가장 작은 고객에게 PRT 차량을 배차하는 규칙이다. 참고로, 본 연구에서 고객이 차량을 탑승한 후에 목적지를 입력한다고 가정하였으나, 비교 실험을 위하여 FOFO의 경우 해당 가정 사항을 무시하고 차량을 배차할 때 목적지에 대한 정보를 미리 알 수 있다고 가정한다.

### 4.2 실험결과

Fig. 6와 Fig. 7은 각 배차규칙의 성능지표를 보여준다. x-축은 평균 공차 이동거리를 나타내며, y-축은 고객 평균

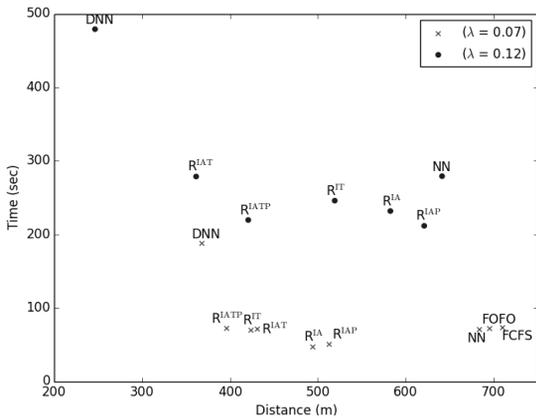


Fig. 6. Average empty travel distance and average customer waiting time

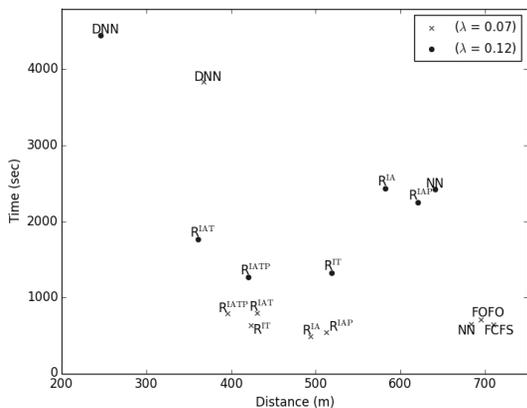


Fig. 7. Average empty travel distance and maximum customer waiting time

대기시간을 나타낸다. 도착률이 낮을 때( $\lambda=0.07$ ) 고객 평균 대기시간은 DNN을 제외하고 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 도착률이 높은 상황에서는( $\lambda=0.12$ ) 각 배차 규칙의 성능지표 차이가 확연히 드러난다. 이 중  $R^{IAT}$ 와  $R^{IATP}$ 는 두 가지 성능지표에 대하여 모두 우수한 결과를 보여준다. Fig. 7의 y-축은 고객의 최대 대기시간을 나타낸다. 본 연구에서 개발된 배차 규칙의 경우 평균 대기시간의 결과와 유사함을 알 수 있으며, DNN의 경우 최대 대기시간이 상대적으로 큰 것을 볼 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7에 따르면, 본 연구가 제시한 온라인 PRT 배차 알고리즘은 공차 이동거리와 고객 대기시간을 함께 고려했을 때(multi-objective) DNN을 제외한 기존의 배차 규칙보다 우세함(dominant)을 확인할 수 있다. DNN은 공차 이동거리에서 본 연구가 제시한 알고리즘보다 나은 성능을 보인다. 하지만 대기시간이 상대적으로 커 고객 서비스가 중요한 PRT 시스템에 적용하기에는 어려움이 있을 것으로 판단된다. 또한 도착률이 낮을 경우, DNN과 본 연구의 알고리즘 간의 공차 이동거리 차이가 크지 않다. 따라서 본 연구의 방법론이 DNN보다 PRT 운영 환경에 적합하다고 볼 수 있다.

Fig. 8은 각 배차 규칙의 평균 공차 이동거리를 서로 다른 도착률에 대해 나타낸 것이다. FCFS와 FOFO 배차 규칙은 도착률이 0.08 이상에서, DNN 배차 규칙은 도착률이 0.12 이상인 조건에서 PRT 시스템이 안정 상태에 이르지 못하였다. 즉, 이들 배차 규칙은 혼잡한 상황에서 사용하기에 적절하지 않음을 알 수 있다. 참고로, FOFO는 일반적으로 시스템 평균 고객 수의 측면에서 유리한 것으로 알려져 있다. 하지만 도착률이 높을 경우 시스템이 안정 상태에 이르지 못했음을 확인할 수 있다. 이는 장

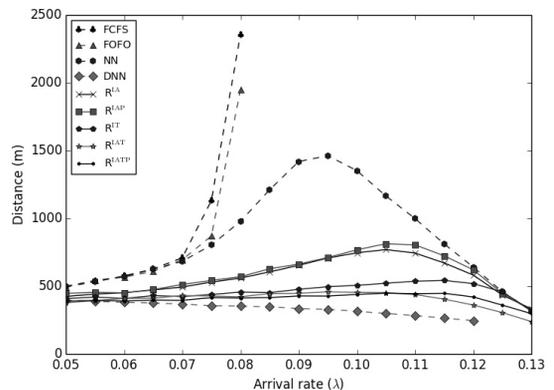


Fig. 8. Average empty travel distance

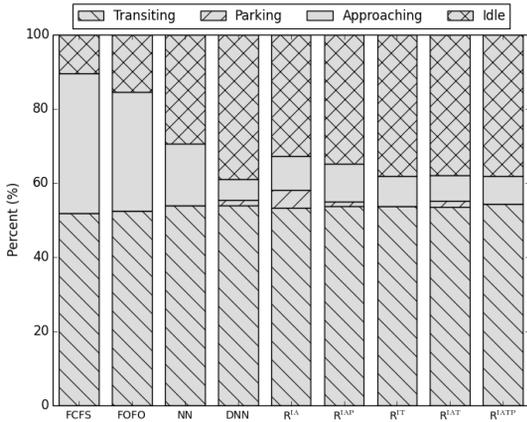


Fig. 9. Ratio of PRT vehicle states ( $\lambda=0.08$ )

거리 고객보다 단거리 고객이 먼저 서비스 받을 가능성이 커, 공차 이동거리의 증가와 함께 장거리 고객이 시스템에 오랫동안 머무르게 되기 때문이다.

Fig. 8을 보면 NN,  $R^{IA}$ ,  $R^{IAP}$ 가 종 모양을 그리는 것을 확인할 수 있다. 이는 도착률이 낮을 때는 정류장에 대기 중인(Idle 상태) PRT 차량이 많아 상대적으로 공차 이동거리가 작았으나, 도착률이 높아짐에 따라 정류장에 대기 중인 차량의 수가 줄어들기 때문으로 판단된다. 그리고 도착률이 더 높아지면 다시 공차 이동거리가 줄어드는데, 이는 다수의 고객이 정류장에 대기 중이기 때문에 서비스를 마친 PRT 차량이 이들 중 가까운 고객을 태우러 가기 때문으로 파악된다. 이는 Sheridan 등<sup>[13]</sup>과 동일한 결과를 보여준다.

온라인 PRT 배차 알고리즘은 DNN을 제외한 기존의 배차 규칙(FCFS, FOFO, NN)보다 항상 공차 이동거리가 작다. DNN의 공차 이동거리가 작은 이유는 의사결정 시점에서 PRT 차량이 자신에게 가까운 고객만 서비스하고 그렇지 않은 대기 고객은 무시하기 때문이다. 그 결과 한 계치( $\lambda=0.12$ )를 넘은 이후에는 시스템이 안정 상태에 이르지 못하는 것으로 판단된다.

$R^{IT}$ ,  $R^{IAT}$ ,  $R^{IATP}$ 의 공차 이동거리는  $R^{IA}$ 와  $R^{IAP}$ 보다 짧는데, 이는 전술한 바와 같이 Transiting 상태가 배차 대상에 포함되어 있을 때 공차 이동거리를 감소시킬 수 있음을 확인시켜준다.

Fig. 9는 PRT 차량의 운행 상태 비율을 보여준다. Approaching과 Parking 상태 비율의 합은 PRT 차량이 공차 상태로 운행된 비율을 의미하고, Idle 상태의 비율을 통하여 차량의 가용률(utilization)을 추정할 수 있다. 도

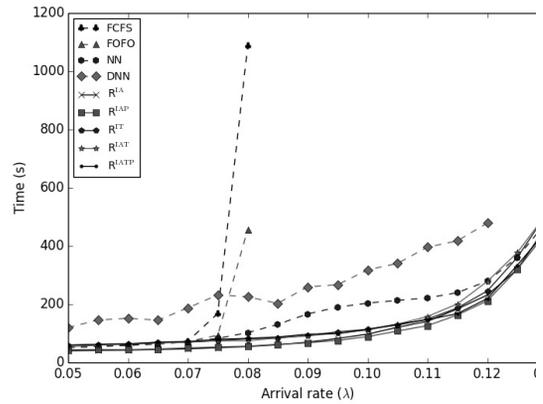


Fig. 10. Average customer waiting time

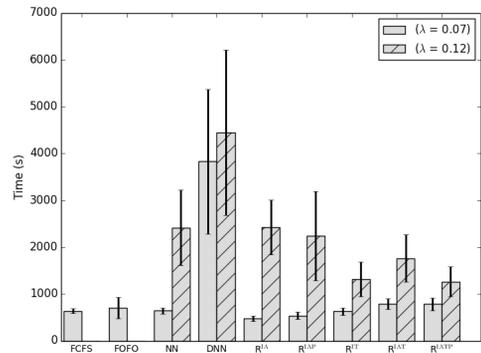


Fig. 11. Maximum customer waiting time

착률과 서비스한 고객의 수가 같은 상황에서 차량의 가용률이 상대적으로 높은 것은 차량을 효율적으로 배차하지 못하였고 차량 이동으로 인한 비용이 더 발생하였음을 의미한다. 따라서 가용률이 높은 FCFS와 FOFO 보다 DNN 또는 본 연구에서 제시하는 알고리즘이 PRT 차량을 효율적으로 배차하였음을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 배차 규칙에 따른 고객의 평균 대기시간을 보여준다. 먼저 DNN은 전반적으로 다른 배차 알고리즘보다 고객 대기시간이 긴 것을 확인할 수 있다. 다음으로 사용되는 배차 범위의 특징을 확인할 수 있다.  $R^{IA}$ 와  $R^{IAP}$ 는 고객 평균 대기시간이 짧다. 이는 Approaching 상태가 배차 범위에 포함되어 있을 때 고객 대기시간을 줄일 수 있음을 확인시켜 준다. 한편, 배차 범위에 Transiting 상태가 포함된 경우 전반적으로 고객 대기시간이 길어지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 고객 최대 대기시간에 대한 결과이다. 각 막대 그래프의 중앙에 표시된 선은 반복 실험 결과치의 표

준 편차를 나타낸다. DNN은 다른 배차 규칙에 비하여 표준 편차가 크다. 이는 고객 요청 발생의 위치에 따라 의사 결정 결과가 크게 달라지기 때문이다. Fig. 10과 Fig. 11의 결과는 고객 평균 대기시간 측면에서 성능이 좋았던 배차 규칙이 고객 최대 대기시간에서는 성능이 좋지 않을 수 있음을 보여준다. Fig. 10에서  $R^{IAP}$ 는 항상 다른 배차 규칙에 비하여 고객의 평균 대기시간이 낮았지만 Fig. 11을 살펴보면 높은 도착률에서  $R^{IAP}$ 의 편차가 증가하고  $R^{IT}$ 보다 고객 최대 대기시간이 길어지는 것을 확인할 수 있다. 이는  $R^{IAP}$ 가 고객의 탑승 요청을 적절하게 처리하지 못하여 일부 고객의 대기시간이 길어졌음을 의미한다.

## 5. 결 론

본 연구는 PRT 배차 문제를 정의하고, 이를 해결하기 위하여 온라인 PRT 배차 알고리즘을 제시하였다. 해당 알고리즘은 이분 매칭을 바탕으로 NN 배차 규칙을 확장하여 다수의 PRT 차량과 다수의 고객을 함께 고려하여 배차를 수행하였다. 그리고 PRT 차량의 상태를 정의하여 전체 차량 중 배차 대상을 체계적으로 선택하는 방법을 제시하였다. 또한, 시뮬레이션 실험을 통하여 주요하게 다음 두 가지 사실을 확인하였다.

- PRT 배차 범위에 따른 성능지표 차이가 존재한다.
- 본 연구에서 제시하는 알고리즘이 기존 배차 규칙(FCFS, FOFO, NN, DNN)에 비해 PRT 운영 환경에 보다 적합하다.

구체적으로, 배차 범위에 Transiting 상태가 포함된 경우 온라인 PRT 배차 알고리즘은 공차 이동거리에 대해서 좋은 성능지표를 보여주었다. 그리고 Approaching 상태를 배차 범위에 포함하는 것이 고객의 탑승요청에 민첩하게 대처하여 고객의 대기시간을 줄일 수 있음을 밝혔다. 또한 기존의 연구가 높은 도착률에서 시스템이 안정화 상태에 이르지 못한 것과 달리, 본 연구에서 제시한 온라인 PRT 배차 알고리즘은 공차 이동거리와 고객 대기시간에 대하여 보다 나은 결과를 보여주었다. 그리고 전술된 두 가지 목적을 함께 고려한 지표에서도 상대적으로 우수한 성능을 보였다.

온라인 PRT 배차 알고리즘은 PRT 배차 문제 외에도 다양한 연구에 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 예를 들어 생활과 밀접하게 관련된 택시 배차에 활용하여 고객 만족도와 에너지 사용 효율을 높일 수 있다. 그리고 재난 상황에서 구급차를 위급한 환자에 배차하는 문제에도 사

용될 수 있을 것이다. 또한 공장의 규모가 증가함에 따라 AGV의 사용이 더 활발해질 경우 본 연구의 결과가 적용될 수 있을 것으로 생각된다.

추후 연구로 시간에 따라 고객 발생률과 발생 지점 등이 변하는 non-homogeneous 환경의 고려가 필요할 것으로 생각된다. 그리고 차량 간의 간섭(conflict)을 고려하여 배차뿐만 아니라 각 차량의 경로 계획을 함께 제시하는 연구가 필요할 것이다. 동시에 기존의 AGV 배차 등 다른 환경에서 개발된 다양한 방법론을 PRT 시스템에 적용하는 노력도 필요할 것이다.

## References

1. Berbeglia, G., Cordeau, J.-F. and Laporte, G., "Dynamic pickup and delivery problems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 202, No. 1, pp. 8-15, 2010.
2. Bilge, U., Esenduran, G., Varol, N., Ozturk, Z., Aydın, B. and Alp, A., "Multi-attribute responsive dispatching strategies for automated guided vehicles", *International Journal of Production Economics*, Vol. 100, No. 1, pp. 65-75, 2006.
3. Briskorn, D., Drexl, A. and Hartmann, S., "Inventory-based dispatching of automated guided vehicles on container terminals", *OR Spectrum*, Vol. 28, No. 4, pp. 611-630, 2006.
4. Chen, Z.-L. and Xu, H., "Dynamic Column Generation for Dynamic Vehicle Routing with Time Windows", *Transportation Science*, Vol. 40, No. 1, pp. 74-88, 2006.
5. Confessore, G., Fabiano, M. and Liotta, G., "A network flow based heuristic approach for optimising AGV movements", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 24, No. 2, pp. 405-419, 2013.
6. Egbelu, P.J. and Tanchoco, J.M.A., "Characterization of automatic guided vehicle dispatching rules", *International Journal of Production Research*, Vol. 22, No. 3, pp. 359-374, 1984.
7. Grunow, M., Gunther, H.-O. and Lehmann, M., "Strategies for dispatching AGVs at automated seaport container terminals", *OR Spectrum*, Vol. 28, No. 4, pp. 587-610, 2006.
8. Haghani, A. and Jung, S., "A dynamic vehicle routing problem with time-dependent travel times", *Computers and Operations Research*, Vol. 32, No. 11, pp. 2959-2986, 2005.
9. Hiller, B., Krumke, S.O. and Rambau, J., "Reoptimization gaps versus model errors in online-dispatching of service

- units for ADAC”, *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 154, No. 13, pp. 1897-1907, 2006.
10. Ho, Y.-C. and Liu, H.-C., “A simulation study on the performance of pickup-dispatching rules for multiple-load AGVs”, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 51, No. 3, pp. 445-463, 2006.
  11. Lee S., “The role of centrality in ambulance dispatching”, *Decision Support Systems*, Vol. 54, No. 1, pp. 282-291, 2012.
  12. Regan, A.C., Mahmassani, H.S. and Jaillet, P., “Evaluation of Dynamic Fleet Management System: A Simulation Framework”, *Transportation Research Record*, Vol. 1645, pp. 176-184, 1998.
  13. Sheridan, P.K., Gluck, E., Guan, Q., Pickles, T., Balcioglu, B. and Benhabib, B., “The dynamic nearest neighbor policy for the multi-vehicle pick-up and delivery problem”, *Transportation Research Part A*, Vol. 49, pp. 178-194, 2013.
  14. UK Tram, “Advice Note for Promoters Considering Personal Rapid Transit”, 2012.
  15. Zhicheng, B., Weijian, M., Xiaoming, Y., Ning, Z. and Chao, M., “Modified Hungarian Algorithm for Real-Time ALV Dispatching Problem in Huge Container Terminals”, *Journal of Networks*, Vol. 9, No. 1, pp. 123-130, 2014.



**한 충 균** (jerryhan88@gmail.com)

2013 부산대학교 산업공학과 학사  
2013~현재 부산대학교 산업공학과 석사과정

관심분야 : 시설물류, 시뮬레이션 방법론



**권 보 배** (hajibin@pusan.ac.kr)

2007 동양대학교 산업공학과 학사  
2009~현재 부산대학교 산업공학과 석박사통합과정

관심분야 : 시뮬레이션 방법론, 스케줄링



**김 백 현** (bhkim@krii.re.kr)

1994 인하대학교 전자공학과 학사  
1996 인하대학교 전자공학과 석사  
2003 인하대학교 전자공학과 공학박사  
2003~현재 한국철도기술연구원 선임연구원

관심분야 : 전자통신, 열차제어 시뮬레이션



**정 락 교** (rgjeong@krii.re.kr)

1991 인하대학교 전기공학과 학사  
1999 인하대학교 전기공학과 석사  
2005 인하대학교 전기공학과 공학박사  
1990~1994 한진중공업 사원  
1995~현재 한국철도기술연구원 책임연구원

관심분야 : 전기전자, 열차급전 시뮬레이션



**이 훈** (pisycho@tsb.co.kr)

2011 부산대학교 물류IT협동과정 박사 수료  
1997~현재 (주)토탈소프트뱅크 물류시스템연구소 소장

관심분야 : 해운·항만 물류 정보시스템, 여객 운송 정보시스템



**하 병 현** (bhha@pusan.ac.kr)

1998 서울대학교 산업공학과 학사

2005 서울대학교 산업공학과 박사

2005~2006 (주)사이버메드 연구소장

2006~현재 부산대학교 산업공학과 부교수

관심분야 : 항만물류, 온톨로지, Business Process