

최소 비용할당 기반 온라인 지게차 운영 알고리즘

권보배 · 손정열 · 하병현[†]

An Online Forklift Dispatching Algorithm Based on Minimal Cost Assignment Approach

BoBae kwon · Jung-Ryoul Son · Byung-Hyun Ha[†]

ABSTRACT

Forklifts in a shipyard lift and transport heavy objects. Tasks occur dynamically and the rate of the task occurrence changes over time. Especially, the rate of the task occurrence is high immediately after morning and afternoon business hours. The weight of objects varies according to task characteristic, and a forklift also has the workable or allowable weight limit. In this study, we propose an online forklift dispatching algorithm based on nearest-neighbor dispatching rule using minimal cost assignment approach in order to attain the efficient operations. The proposed algorithm considers various types of forklift and multiple jobs at the same time to determine the dispatch plan. We generate dummy forklifts and dummy tasks to handle unbalance in the numbers of forklifts and tasks by taking their capacity limits and weights. In addition, a method of systematic forklift selection is also devised considering the condition of the forklift. The performance indicator is the total travel distance and the average task waiting time. We validate our approach against the priority rule-based method of the previous study by discrete-event simulation.

Key words : Shipyard, forklift dispatching, nearest-neighbor rule, minimum-cost assignment, online algorithm

요약

조선소의 지게차는 작업 특성상 무거운 물건을 상/하차하거나 이송하는 작업이 빈번하다. 작업은 동적이며 시간대별로 생성 비율이 다르다. 특히 오전과 오후 업무시간 직후에 작업 발생 비율이 높은 경향을 보인다. 이러한 상/하차 작업과 이송 작업의 무게는 매번 다르며, 활용되는 지게차 역시 작업 가능한 허용무게의 제약이 있다. 본 연구에서는 지게차의 원활한 운영을 위해 최소 비용할당을 사용한 최근린 배차 규칙 알고리즘을 제안한다. 제시된 알고리즘은 다양한 종류의 지게차와 다수의 작업을 동시에 고려하여 배차를 결정하며, 지게차 종류에 따른 작업 불가능을 고려하기 위해 가상 지게차와 가상 작업을 생성하는 방법을 제안한다. 그리고 차량의 상태를 고려하여 체계적으로 지게차를 선택하는 방법도 함께 제시한다. 성능지표는 평균 공차이동거리와 평균 작업대기시간으로 한다. 성능비교를 위해 조선소의 지게차 운영방식을 모델링한 우선순위 규칙을 비교 대상으로 한다. 시물레이션을 통해 제시한 알고리즘의 우수성을 확인한다.

주요어 : 조선소, 지게차 배차, 최근린 배차 규칙, 최소비용 할당, 온라인 알고리즘

1. 서론

조선소의 선박 건조 프로세스는 크게 수주, 설계, 생산,

건조 단계로 나뉜다. 생산 및 건조 단계에서 설치되어야 하는 자재와 도구들은 대부분 대형 중량물이므로 지게차를 이용하여 상하차하며, 수량이 적은 경우에는 지게차로 직접 이송하는 작업이 발생된다. 조선소의 특성상 사람이 들 수 없는 자재들(블록, 파이프, 철판, 등)이 많아서 상하차하거나 이송하는 작업에 주로 지게차가 사용된다. 지게차는 각각의 차량마다 허용용량이 제한적이며, 자재의 무게는 다양하기 때문에 여러 용량의 지게차가 운영된다.

Received: 14 March 2018

Accepted: 16 April 2018

[†] Corresponding Author: Byung-Hyun Ha

E-mail: bhha@pusan.ac.kr

Pusan National University

조선소에서 많이 사용되고 있는 지게차의 비효율적인 운영은 작업대기시간을 증가시켜 생산성 저하 문제를 일으킬 수 있다. 그러므로 조선소에서는 전사적으로 광범위하게 사용되는 다양한 지게차를 효율적으로 운영하는 것이 생산성 향상에 중요한 요소이다. 그러나 지게차 운영에 관한 연구는 미미한 실정이다. 조선소에서는 주로 블록의 공간 일정 계획과 트랜스포터 일정계획과 같은 연구가 진행되어 왔다. Koh et al.(1999), Cho et al.(2001) 그리고 Koh et al.(2011) 등 많은 연구자들이 조선소에서의 블록 공간계획문제(spatial scheduling problem)를 연구 중이다. 트랜스포터 일정계획 문제에 관하여 Joo and Kim(2013), Park and Seo(2012), Roha and Cha(2011) 그리고 Lee et al.(2009) 등 많은 연구가 수행되고 있다.

조선소에서 지게차 운영은 계획배차와 실시간배차 두 가지 방법이 사용된다. 계획배차는 작업장에서 일정 시간 전에 지게차를 요청하여 미리 배차를 받는 것이며, 실시간배차는 실시간으로 지게차를 요청하여 배차를 받는 것이다. 계획배차는 극히 일부분이며, 작업시간 중에 실시간으로 지게차를 요청하는 경우가 대부분이다. 따라서 지게차의 효율적인 운영을 위해서는 실시간으로 생성되는 다양한 중량의 작업에 대해 다양한 용량의 지게차를 적절하게 배차하는 방법이 요구된다. 본 연구에서는 실시간으로 요청되는 다양한 무게의 작업을 처리하기 위해 용량을 고려한 지게차 배차 방법론을 제안한다.

지게차 운영에 있어서 상하차하거나 운반하고자 하는 자재들을 작업으로 볼 경우, 작업은 처리 순서에 따라 공차 이동 거리가 달라지므로 시간 의존적 준비 시간(time-dependent setup time)을 갖는 복수 기계 일정계획 문제(multi-machine scheduling problem)와 유사하다. 작업요청 지점을 하나의 위치로 보는 동적차량경로문제(dynamic vehicle routing problem)와도 유사하다고 할 수 있다. 이는 지게차가 작업 대상물을 상하차하거나 이송하는 순서에 의해 공차운행시간과 작업의 대기시간이 발생하기 때문이다. 공차운행시간과 작업대기시간을 최소로 하는 차량배차계획을 결정하는 것이 본 문제의 요지이다. 지게차 배차문제에 대한 연구는 미미한 실정이지만 Kwon et al.(2014)에서 시뮬레이션을 통하여 조선소에서의 지게차 운영정책과 우선순위 규칙의 효율성에 관한 연구가 있다. 하지만 차량 배차에 관한 연구는 다양한 산업에서 활발하게 진행 중에 있다. 제조 공정, 창고, 공항 그리고 컨테이너 터미널 등에서는 AGV(automated guided vehicle)의 효율적인 운영을 위한 연구가 다양하게 진행되고 있다(Bilge et al., 2006; Ho and Liu, 2006;

Confessore et al., 2013; Zhicheng et al., 2014). Hayes et al.(2004), Dean (2008), 그리고 Lee (2012) 등과 같은 많은 연구자가 급급차 배차문제에 대해 연구를 진행 중이다. 최근 친환경 교통수단으로 각광받고 있는 PRT(personal rapid transit)의 자동운행을 위한 PRT 배차 및 경로계획 연구도 많이 이루어지고 있다(Ingmar, 2003; Lees-Miller, 2011; Han et al., 2014; Han et al., 2015).

지게차의 운영계획은 중량을 고려하여 다수의 작업을 다양한 종류의 지게차에 배차해야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 지게차 상태에 따라 계획수정을 허용하는 온라인 배차 방법론을 제안한다. 이때 배차 할당모형 생성에 있어서 발생하는 문제를 해결하기 위해 지게차의 허용 중량에 적합한 가상 지게차와 가상 작업을 생성하는 방안을 제시한다. 성능지표는 지게차가 작업 요청에 빠르게 대응 하는지 알 수 있는 평균 작업대기시간(average job waiting time)과 배차로 인하여 발생하는 지게차의 불필요한 운영을 확인할 수 있는 평균 공차이동거리(average empty travel distance)로 한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2장에서 조선소에서의 온라인 지게차 배차 문제를 정의하고 3장에서 최소 비용 할당을 사용한 온라인 배차규칙 방법론을 제시한다. 그리고 4장에서 시뮬레이션을 사용하여 배차규칙을 비교 및 분석한다. 마지막으로 5장에서는 결론 및 추후 연구내용을 서술한다.

2. 문제정의

조선소에서 전사적으로 운영되고 있는 지게차는 다양한 종류(10, 20, 30톤급 등)가 있다. 이러한 지게차는 적재능력을 초과하는 작업은 할 수 없으며, 조선소 내에서는 지정된 속도로 이동하여야 한다. 그리고 지게차는 공차가 되는 시점에 위치한 장소에서 대기한다. 조선소에서 실시간으로 지게차를 요청하는 작업의 유형은 두 가지이다. 첫 번째 작업 유형은 특정 지역에서 대상물을 싣고 내리는 행위를 하는 상하차 작업이고, 두 번째 작업 유형은 특정 지역에서 다른 지역으로 대상물을 이동하는 이송 작업이다. 이러한 작업은 출발지와 도착지 혹은 작업장소, 톤수, 작업 유형 등의 요구조건에 따라 작업 가능한 지게차가 배정된다.

본 논문의 주요 가정은 다음과 같다. 지게차는 여러 종류가 있으며, 공차와 상차의 주행 속도는 다르다. 지게차는 항상 최단 경로를 사용하여 작업 장소로 이동한다. 그리고 요청되는 작업의 취소는 없다.

본 논문에서는 실제 조선소에서 작업 발생 비율을 바탕으로 작업을 생성한다. 지게차 작업요청은 특정 시간대에 발생 빈도가 서로 다른 특징을 가진다. 이를 표현하기 위하여 한 시간 단위로 타임 슬롯(time slot)이 정의되었다. 타임 슬롯 단위로 작업의 생성 비율을 정의한다. 또한 조선소에는 많은 작업장이 존재하므로 각 작업장마다 작업을 발생시키는 것은 어려움이 있다. 이에 본 논문에서는 조선소를 일정 크기의 영역으로 구분하여 영역별로 작업을 발생시킨다. 이를 Table 1과 같은 O-D 행렬을 사용하여 표현한다. O-D 행렬에서 요소는 작업요청지역 o 에서 이송지역 d 로 이송(상하차)하는 작업 발생률 λ_{od} (작업 수/단위 시간)을 의미한다. 작업요청지역 o 와 이송지역 d 가 동일한 작업은 상하차 작업이며 상하차 작업의 작업시간은 삼각 분포(triangular distribution)를 따른다고 가정한다.

Table 1. O-D matrix

Transfer area(d) \ Requested area(o)	Area 1	Area 2	Area 3	...	Area m
Area 1	λ_{11}	λ_{12}	λ_{13}	...	λ_{1m}
Area 2	λ_{21}	λ_{22}	λ_{23}	...	λ_{2m}
Area 3	λ_{31}	λ_{32}	λ_{33}	...	λ_{3m}
⋮
Area m	λ_{m1}	λ_{m2}	λ_{m3}	...	λ_{mm}

3. 온라인 지게차 운영 알고리즘

본 절에서는 먼저 지게차 상태에 따라 지정 가능한 배차 범위를 정의하고 이를 바탕으로 지게차를 배차하는 방법을 제안한다. 그리고 배차 할당모형을 생성하는데 있어서 지게차 대수와 작업의 개수가 동일하지 않아 발생하는 문제를 해결하기 위해 지게차의 허용 중량에 적합한 가상 지게차와 가상 작업의 생성 방법을 제안한다.

3.1 지게차 배차 범위

지게차를 작업에 배차하는데 있어서는 지게차의 위치, 상태 정보와 대기 작업의 위치, 도착 시간, 작업 유형 등이 고려된다. 이때 전체 지게차 중 어떤 상태의 지게차를 배차 대상으로 고려하느냐에 따라 작업에 지게차를 배차하거나 기존에 계획된 배차계획이 수정되기도 한다. 예를 들어, 공차인 지게차만을 고려하여 배차할 경우 기존에 결정된 배차계획에 대한 계획수정은 고려되지 않는다. 그

러나 작업을 할당 받고 이동 중인 차량과 공차를 동시에 고려할 경우 기존 계획은 수정되고 공차만을 고려한 방법과는 다른 결과가 도출될 수 있다. 이에 본 절에서는 지게차의 상태를 정의하고, 이를 바탕으로 하는 배차범위를 제안한다.

조선소에서 운영되는 지게차는 배차를 받았을 때 다음과 같이 움직인다. 공차(Idle)인 지게차가 다른 곳에 위치한 작업을 배차 받은 경우 지게차는 작업요청지점으로 이동(Move)한다. 작업요청지점에 도착하면 지게차는 작업(Work)을 시작한다. 작업을 완료 한 이후 다음 작업을 바로 배차 받았을 경우 작업요청지점으로 이동하거나 동일 지점일 경우 바로 작업을 시작한다. 그렇지 않을 경우 공차 상태가 되어 대기한다. 따라서 지게차의 상태는 Move, Idle, 그리고 Work로 구분한다. 여기서 Work 상태에서의 세부적인 작업순서는 다음과 같다. 작업이 시작되면 작업 준비(Set up) 상태가 되어 작업에 대한 상세 지시를 받는다. 그 후, 작업 유형에 따라 이송 작업(delivery)과 상하차 작업(load/unload)을 수행한다.

앞서 정의한 지게차 상태정의를 바탕으로 지게차의 배차 범위를 다음과 같이 제안한다.

- F^I : 의사결정 시점에 Idle 상태의 지게차만 배차 대상이 된다.
- F^{IM} : 의사결정 시점에 Idle과 Move 상태의 지게차만 배차 대상이 된다.
- F^{IMW} : 의사결정 시점에 Idle, Move, 그리고 Work 상태의 지게차만 배차 대상이 된다.

배차 범위에 포함되는 지게차에 따라 기대되는 결과는 다음과 같다. Idle 상태의 지게차는 항상 포함된다. 배차 범위에 Move 상태가 포함되는 경우 기존 배차 계획이 수정될 수 있다. 즉, 새로운 작업이 발생하거나 다른 지게차의 작업이 완료되었을 경우, 이동 중이던 지게차의 배차 계획이 바뀔 수 있다. 이는 이동 중이던 지게차가 지나가는 지점 근처에 위치한 작업에 재배차될 확률이 높아 공차 이동을 줄일 수 있을 것으로 기대된다. Work을 포함하는 경우는 현재 작업 중인 지게차의 작업 완료 시간을 예상하여 배차하기 때문에 굳이 멀리 있는 공차를 배차할 필요가 없다. 이는 작업대기시간과 공차 이동을 함께 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

다음과 같은 의사결정 시점에 따라 지게차를 배차한다.

- 새로운 작업이 발생했을 때
- 지게차가 작업을 완료했을 때

제시된 의사결정 시점마다 본 절에서 제안한 지게차의 배차 범위에 따른 지게차의 위치, 상태 정보를 토대로 배차를 수행한다. 이때 지게차 범위에 따라 배차 대상 작업을 시작하는데 걸리는 시간은 각각 다르다. 배차 범위에 따른 배차 대상 작업을 시작하는데 걸리는 시간은 아래 소절에서 설명한다.

3.1.1 배차 범위 F^I

배차 범위가 F^I 인 경우 고려되는 지게차의 상태는 Idle이다. 이는 공차인 상태로 멈춰서 대기 중인 상태로 작업이 배차될 시 작업요청지점으로 바로 이동할 수 있고, 동일 지점일 경우 바로 작업을 시작할 수 있다. 이 경우 현재 의사결정 시점에 배차 대상 작업에 가는데 걸리는 시간 mt_{od} 는 지게차가 위치한 지점 o 에서 작업요청지점 d 까지의 이동시간이다.

3.1.2 배차 범위 F^{IM}

배차 범위가 F^{IM} 인 경우 고려되는 지게차의 상태는 Idle과 Move이다. Idle 상태인 지게차는 3.1.1에서 제시한 것과 같다. Move 상태인 지게차는 앞선 의사결정 시점에 작업을 배차 받아 이동 중으로 현재 시점에 기존 배차계획의 수정을 위해 지게차는 현재 위치에서 이동을 멈춘다. 그리고 배차 대상 작업에 가는데 걸리는 시간 mt_{od} 를 구한다. mt_{od} 는 현재 이동을 멈춘 지점 o 에서 작업요청지점 d 까지의 이동시간이다.

3.1.3 배차 범위 F^{IMW}

배차 범위가 F^{IMW} 인 경우 모든 상태의 지게차가 고려 대상이 된다. Idle과 Move 상태인 지게차는 3.1.1과 3.1.2에서 제시한 것과 같다. Work 상태의 경우, 작업이 시작되면, 작업 준비 이후, 이송 작업 혹은 상하차 작업을 각각 거쳐서 작업이 완료된다. 그러므로 배차 대상 작업을 시작하는데 걸리는 시간은 전체 작업이 완료되는데 소요되는 시간에 작업이 완료되는 지점에서 배차 대상 작업의 요청지점까지의 이동시간을 합해야한다. 지게차가 작업 중인 상태에서 예상되는 작업완료 소요시간은 다음과 같다.

첫 번째는 작업 준비 중에 예상되는 작업완료 소요시간이다. 작업 준비 시간 X 는 Uniform(a, b) 분포를 따른다. 그러므로 현재 시각 y 를 기준으로 예상되는 작업준비 소요시간 x 의 기댓값은 식(1)과 같다.

$$UE(x|X > y) = \int_y^b xu(x|y)dx \quad (1)$$

여기서 $u(x|y) = U'(x|y)$ 이다. $U(x|y)$ 는 식(2)와 같으므로 $u(x|y)$ 는 식(3)이다.

$$\Pr(X \leq x|X > y) = \frac{\Pr(y < X \leq x)}{\Pr(X > y)} = \frac{x-y}{b-y} \quad (2)$$

$$u(x|y) = \frac{1}{b-y} \quad (3)$$

작업 준비가 끝나면 이송 작업 혹은 상하차 작업을 해야 한다. 그러므로 각 작업별로 예상되는 이송 작업과 상하차 작업의 소요시간을 더해야 작업 준비 중인 지게차의 총 작업완료 소요시간을 구할 수 있다. 작업 준비 이후 이송작업을 해야 할 경우, 식(1)에 현재 작업 중인 이송 작업의 작업요청 위치 o 에서 이송 위치 d 까지의 소요시간 dt_{od} 를 더한다. 작업 준비 이후 상하차 작업을 해야 할 경우, 상하차 작업은 삼각 분포를 따르므로 Triang(a, b, c)의 기댓값 $\frac{a+b+c}{3}$ 를 식(1)에 더한다.

두 번째는 이송 작업 중인 지게차의 예상 작업완료 소요시간이다. 이 경우, 현재 시각을 기준으로 지게차가 위치한 지점 o 에서 이송지점 d 까지 걸리는 시간 dt_{od} 가 이송 작업의 작업완료 소요시간이다.

마지막으로 상하차 작업 중인 지게차의 예상 작업완료 소요시간이다. 현재 시각 y 를 기준으로 남아있는 상하차 작업의 예상 소요시간 x 의 기댓값은 식(4)와 같다.

$$TE(x|X > y) = \int_y^b xt(x|y)dx \quad (4)$$

여기서 $t(x|y) = T'(x|y)$ 이다. $T(x|y)$ 는 식(5)이다.

$$\Pr(X \leq x|X > y) = \frac{\Pr(y < X \leq x)}{\Pr(X > y)} \quad (5)$$

$\frac{\Pr(y < X \leq x)}{\Pr(X > y)}$ 는 현재 시각 y 는 각각 $a \leq y \geq c$ 와 $c < y \geq b$ 인 두 가지 상황이 생긴다. 이때 예상되는 작업 완료 소요시간 x 는 $a \leq y \leq c$ 인 상황에서 $y \leq x \leq c$ 혹은 $c < x \leq b$ 이거나 $c < y \geq b$ 인 상황에서 $y \leq x \leq b$ 이다. 그러므로 식(4)의 x 의 기댓값은 현재 시각 y 를 기준으로 각각 구해진다. 먼저 현재 시각 y 가 $a \leq y \geq c$ 인 상황은 식(6)과 같다.

$$TE_1(x|X > y) = \int_y^b xt(x|y)dx \quad (6)$$

$$= \int_y^c xt_1(x|y)dx + \int_c^b xt_2(x|y)dx$$

여기서 $t_1(x|y) = T_1'(x|y)$ 이고 $t_2(x|y) = T_2'(x|y)$ 는 이다. $T_1(x|y)$ 는 식(7)이고 이에 따라 $t_1(x|y)$ 은 식(13)과 같다.

$$T_1(x|y) = \frac{(x-a)^2 - (y-a)^2}{(b-a)(c-a) - (y-a)^2} \quad (7)$$

$$t_1(x|y) = \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a) - (y-a)^2} \quad (8)$$

그리고 $T_2(x|y)$ 는 식(9)이므로 $t_2(x|y)$ 는 식(10)이다.

$$T_2(x|y) = \frac{(b-a)(b-c)(c-a) - (c-a)(b-x)^2 - (b-c)(y-a)^2}{(b-a)(b-c)(c-a) - (b-c)(y-a)^2} \quad (9)$$

$$t_2(x|y) = \frac{2(c-a)(b-x)}{(b-a)(b-c)(c-a) - (b-c)(y-a)^2} \quad (10)$$

현재 시각 y 가 $c < y \leq b$ 인 상황은 식(11)과 같다.

$$TE_2(x|X > y) = \int_y^b xt_3(x|y)dx \quad (11)$$

여기서 $t_3(x|y) = T_3'(x|y)$ 이다. $T_3(x|y)$ 는 식(12)이고 이에 따라 $t_3(x|y)$ 는 식(13)과 같다.

$$T_3(x|y) = \frac{-(b-x)^2 + (b-y)^2}{(b-y)^2} \quad (12)$$

$$t_3(x|y) = \frac{2(b-x)}{(b-y)^2} \quad (13)$$

제시된 작업의 예상 완료 소요시간에 작업이 완료되는 지점에서 배차 대상 작업의 요청지점까지의 이동시간을 더해 배차 대상 작업에 가는데 걸리는 시간이 된다.

3.2 가상 지게차와 가상 작업 생성

Han et al.(2014)에서는 여러 대의 차량과 다수의 작업을 동시에 고려한 최소비용 할당방법으로 배차를 수행하는 것이 더욱 효율적인 의사결정이 가능함을 증명하였다. 본 연구에서는 Han et al.(2014)이 제안한 방법을 참고하여 지게차 운영에 적합한 배차 방법을 제안한다. 또한, 배차 범위에 따라 계획수정이 허용됨으로 보다 더 효율적인 의사결정이 가능하게 한다.

본 연구에서는 헝가리안 방법(Hungarian method)을 사용하여 배차계획을 도출한다. 지게차 대수와 작업의 개수는 m 과 n 이라 하자. 헝가리안 방법을 적용하기 위해서는 배차 할당모형의 행(m)과 열(n)의 수가 같아야 한다. 그러나 배차 대상이 되는 지게차 대수 m 과 작업의 개수 n 은 같지 않을 수 있다. 이 경우 가상(dummy) 지게차나 가상 작업을 추가하여 행과 열이 동일한 배차 할당모형을 생성한 후 헝가리안 방법을 적용하여 배차계획을 도출한다. 가상 지게차와 가상 작업을 생성하는 것은 여러 방법이 가능하다. 예를 들면, 단순히 $|m-n|$ 의 개수만큼 가상 지게차와 작업을 생성할 수 있다. 이 경우 지게차의 허용 중량이 넘는 작업이 배차되는 문제가 발생할 수 있다. 지게차의 허용 중량별로 부족한 작업이나 지게차를 생성할 수도 있다. 그러나 중량 별로 가상 지게차와 가상 작업을 생성하기 때문에 많은 수의 가상 지게차와 가상 작업이 생성되어 계산시간을 증가시킨다. 또한, 중량에 맞춰 가상 지게차 혹은 가상 작업을 생성하므로 허용 중량이 높은 지게차 근처에 있는 낮은 무게의 작업에 배차될 수 없게 하여 효율성을 떨어뜨릴 수 있다. 그러므로 지게차의 허용 중량에 적합한 가상 지게차와 가상 작업을 생성하는 체계적인 방법이 요구된다.

본 논문에서는 다음과 같이 가상 지게차와 가상 작업을 생성하는 방법을 제안한다. 먼저 지게차의 허용 중량을 기준으로 중량 범위를 나눈다. g 는 중량이 가장 큰 값이다. w_k 는 k 번째 중량을 의미하며 $w_0 = 0$ 을 기준으로 $w_0 < w_1 < w_2 < \dots < w_g$ 로 정렬한다. 예를 들어, 10톤, 20톤, 30톤의 세 유형의 허용중량을 가지는 지게차가 있는 경우, $g = 3$, $w_1 = 10$, $w_2 = 20$, $w_3 = 30$ 이다. m_k 는 배차 대상 지게차 집합에서 w_k 의 중량을 가지는 지게차의 대수이다. n_k 는 배차 대상 작업 집합에서 w_{k-1} 보다 크고 w_k 보다 작거나 같은 무게를 가지는 작업의 개수이다. 중량 범위와 각 중량 별 지게차 대수 및 작업 개수를 바탕으로 가상 지게차와 가상 작업을 생성한다.

중량이 가장 큰 w_g 의 허용 중량을 가지는 지게차는 어떠한 작업도 배차할 수 있으며, w_{g-1} 의 중량을 가지는 지게차는 w_{g-1} 의 중량 보다 작거나 같은 중량의 작업에 배차 할 수 있다. 그러므로 허용 중량이 가장 큰 w_g 부터 역으로 지게차의 부족한 대수를 구해 가는 것이 지게차 허용 중량에 적합하면서도 적절한 대수의 가상 지게차를 생성할 수 있다. 가상 지게차와 가상 작업을 생성하는 방법은 다음과 같다. 총 가상 지게차 대수를 구하기에 앞서 중량이 가장 큰 w_g 의 허용 중량을 가지는 지게차의 가상

지게차 대수 m'_g 를 식(14)와 같이 구한다.

$$m'_g = n_g - m_g \quad (14)$$

그 후 총 가상 지게차 대수 m' 는 식(15)와 같이 구한다.

$$m' = \sum_{k=1}^g m'_k \quad (15)$$

여기서 m'_k 는 w_k 중량의 지게차가 부족한 대수이다. m'_k 는 다음과 같이 계산된다.

$$m'_k = \sum_{i=k}^g n_i - \sum_{i=k}^g (m' + m_i) - m_k, (k = g - 1, \dots, 1) \quad (16)$$

가상 지게차를 포함하는 전체 지게차 대수는 항상 실제 작업의 개수 보다 크거나 같다. 그러므로 총 가상 작업 수는 식(17)과 같이 구한다.

$$n' = \sum_{k=1}^g m_k + m' - \sum_{k=1}^g n_k \quad (17)$$

예를 들어 설명하면, 지게차 m_k 와 작업 n_k 가 Fig. 2와 같을 때, 가상 지게차 m'_k 와 가상 작업 n' 는 다음과 같이 구한다. 먼저 w_g 의 허용 중량을 가지는 지게차 m_3 를 기준으로 식(14)에 따라 가상 지게차 m'_3 를 구한다. 이후 식(16)에 따라 순서대로 w_2 와 w_1 의 중량을 가지는 지게차의 가상 지게차 m'_k 를 구한다. 마지막으로 식(17)에 따라 가상 작업 n' 를 구한다. 이렇게 생성된 가상 지게차는 Fig. 2와 같이 m'_2 와 m'_3 가 생성되며 총 가상 지게차 수는 $m' = m'_2 + m'_3$ 이다. 그리고 총 가상 작업의 수는 n' 이다.

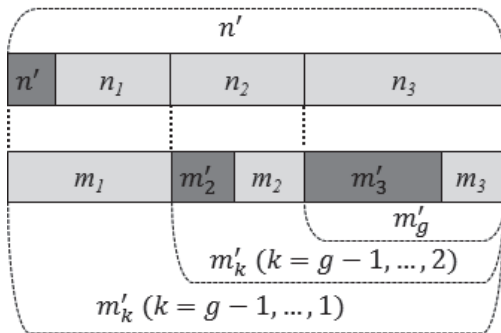


Fig. 2. Example of dummy forklift and dummy job generation

3.3 지게차 운영 알고리즘

본 논문에서 제안하는 온라인 지게차 운영 방법론은 3.1절에서 제시한 의사결정 시점마다 지게차에 작업을 배차한다. 방법론의 구체적인 절차는 다음과 같다.

- Step 1. 배차 대상 지게차 선택:** 전체 지게차 중 배차 대상 지게차를 선택한다.
- Step 2. 가상 지게차와 가상 작업 생성:** 가상 지게차와 가상 작업 m', n' 를 생성한다.
- Step 3. 지게차와 작업 간의 c_{ij} 계산:** 지게차와 작업의 상태와 위치를 바탕으로 c_{ij} 를 계산한다.
- Step 4. 배차 계획 생성:** 헝가리안 방법을 사용하여 지게차와 작업의 배차 계획을 도출한다.
- Step 5. 의사결정 도출:** 지게차와 같은 작업장에 있는 작업을 배차 받은 경우 작업을 시작한다. 타 작업장에 위치한 작업을 배차 받을 경우 지게차를 이동시킨다. 가상 작업을 배차 받은 경우 그 자리에 대기시킨다.

헝가리안 방법으로 배차 결과를 도출하기 위해 필요한 지게차 i 가 작업 j 에 할당되는 비용 c_{ij} 는 다음과 같다.

$$c_{ij} = \begin{cases} t_{ij} & \text{만일 지게차 } i \text{와 작업 } j \text{가 가상이면} \\ & a_i \geq b_j \text{ 경우} \\ M & \text{만일 지게차 } i \text{와 작업 } j \text{가 가상이면} \\ & a_i \leq b_j \text{ 경우} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

여기서 a_i 는 지게차 i 의 최대 허용 중량이고, b_j 는 작업 j 의 무게이다. t_{ij} 는 지게차 i 가 작업 j 를 시작하는데 걸리는 시간이다. M 은 충분히 큰 수이다. 여기서 가상 지게차 i 와 실제 작업 j , 실제 지게차 i 와 가상 작업 j , 그리고 가상 지게차 i 와 가상 작업 j 의 c_{ij} 는 0이다. 즉, i 혹은 j 가 가상이면 c_{ij} 는 항상 0이다. 이는 실제 지게차가 실제 작업을 시작하는데 많은 시간이 걸리는 경우, 배차를 수행하지 않고 다음 의사결정 시점으로 미루게 하여, 미래 상황에 좀 더 역동적으로 대응하도록 그 가능성을 열어두는 것이다.

3.4 배차 예제

배차 예제는 Fig. 3과 같은 상황을 고려한다. Fig. 3에서 지게차 f_i^k 는 i 번째 지게차의 허용용량은 k 톤임을 나타낸다. 작업 j_i^k 는 i 번째 작업의 무게는 k 톤이며 이송작

업 d (상하차 작업 l)임을 나타낸다. 추가로 현재 Move 상태인 지게차 f_4^{10} 은 $j_4^{9'}$ 에 배차되어 작업장 s_3 으로 이동 중인 상태이다. 그리고 Work 상태인 지게차 f_3^5 와 f_2^9 는 각각 상하차 작업과 이송작업을 수행 중이다. f_3^5 의 경우 상하차 작업을 시작한 시점에서 현재까지 5분이 지났으며, f_2^9 은 작업장 s_2 에서 s_6 으로 이송작업 중이다. 의사결정 시점은 새로운 작업 $j_5^{10'}$ 가 도착한 시점이다. 본 절의 배차계획 예시에서는 F^{IM} 과 F^{IMW} 의 배차범위를 사용한다.

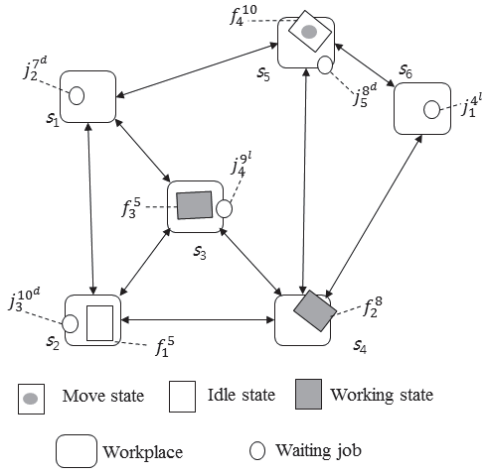


Fig. 3. Example of forklift dispatching

배차 범위 F^{IM} 을 사용한 배차계획은 다음과 같다.

- Step 1. Idle, Move 상태인 지게차 f_1^5, f_4^{10} 이 배차 대상이 된다.
- Step 2. 가상 지게차 m' 는 3이고 가상 작업은 없다.
- Step 3. c_{ij} 값은 Table 2와 같다.
- Step 4. Table 2에서 회색 음영으로 표시된 배차 계획이 수립된다.
- Step 5. f_1^5 는 $j_1^{4'}$ 이 배차 되고, f_4^{10} 은 $j_2^{7'}$ 가 배차된다.

Table 2. Assignment table and results of F^{IM}

Forklift \ Job	$j_1^{4'}$	$j_2^{7'}$	$j_3^{10'}$	$j_4^{9'}$	$j_5^{9'}$
f_1^5	9	M	M	M	M
f_4^{10}	2	6	10	8	0
fd_1	0	0	0	0	0
fd_2	0	0	0	0	0
fd_3	0	0	0	0	0

이 경우 지게차 f_4^{10} 은 기존에 배차된 $j_4^{9'}$ 보다 더 가까운 위치에 있는 $j_2^{7'}$ 로 계획이 수정되었다.

배차 범위 F^{IMW} 을 사용한 배차계획은 다음과 같다.

- Step 1. 모든 지게차가 배차 대상이 된다.
- Step 2. 가상 지게차 m' 는 2이고 가상 작업 n' 는 1이다.
- Step 3. c_{ij} 값은 Table 3과 같다.
- Step 4. Table 3에서 회색 음영으로 표시된 배차 계획이 수립된다.
- Step 5. f_4^{10} 은 $j_2^{7'}$ 가 배차되고 f_1^5 는 Idle 상태가 된다.

Table 3. Assignment table and results of F^{IMW}

Forklift \ Job	$j_1^{4'}$	$j_2^{7'}$	$j_3^{10'}$	$j_4^{9'}$	$j_5^{9'}$	jd_1
f_1^5	9	M	M	M	M	0
f_2^9	5	13	M	M	7	0
f_3^5	8	M	M	M	M	0
f_4^{10}	2	6	10	8	0	0
fd_1	0	0	0	0	0	0
fd_2	0	0	0	0	0	0

이 경우 지게차 f_4^{10} 은 F^{IM} 의 배차 계획과 같은 반면 f_1^5 가 작업 가능한 $j_1^{4'}$ 이 아닌 가상 작업에 배차되어 Idle 상태가 된다. 이는 f_1^5 가 $j_1^{4'}$ 에 가는데 걸리는 시간보다 f_3^5 이 현재 작업을 모두 마치고 $j_1^{4'}$ 에 가는데 걸리는 시간 작으므로 작업대기시간을 줄일 수 있다.

위 두 가지 예시에서는 다음과 같은 특징을 볼 수 있다. Move 상태를 포함한 것은 기존의 배차 계획이 수정되어 이미 배차된 작업보다 좀 더 가까운 작업에 배차될 확률이 높아 공차이동거리를 줄일 수 있을 것으로 예상된다. Work 상태를 포함한 것은 작업 완료 시간을 예상하여 지게차를 대기 중인 작업에 배차한다. 그러므로 F^{IM} 범위를 고려한 배차 방법보다 F^{IMW} 를 고려한 것이 작업 대기시간과 공차이동거리를 함께 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

4. 실험 결과

본 연구에서 제시한 온라인 지게차 운영알고리즘의 실

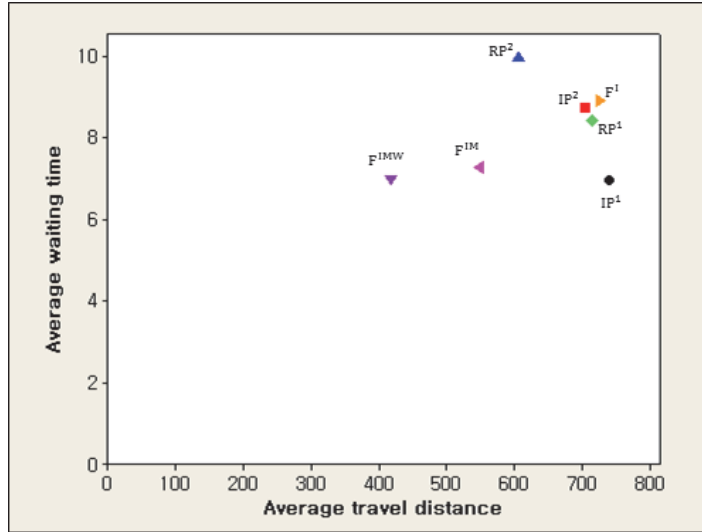


Fig. 4. Average empty travel distance and average customer waiting time

험 환경은 Kwon et al.(2014)의 환경과 동일하며, 실제 조선소를 바탕으로 구축한 네트워크에서 시뮬레이션 실험을 하였다. 시뮬레이션 시간은 30일간 연속적으로 작업을 발생시켰으며, 조선소에서 작업을 시작하는 시간과 동일한 08:00~12:00와 13:00~18:00로 9시간 동안 작업이 발생한다고 가정하였다. 작업 발생률은 08:00~09:00, 13:00~14:00는 아주 높으며, 14:00~15:00는 중간, 그 외에는 보통으로 작업 요청이 발생하였다. 상하차 작업과 이송작업의 발생 비율은 8:2이다. 상하차 작업 시간은 Triangular(10, 20, 17)분을 따른다. 작업 중량은 5톤, 8톤, 10톤으로 3가지가 있다고 가정하였다. 지게차 대수는 허용 중량(5톤, 8톤, 10톤)별 각각 40대로 총 120대가 있다고 가정하였다. 지게차는 공차 상태일 때는 20 km/h로 이동하며 상차 상태일 때는 15 km/h로 이동한다.

Kwon et al.(2014)이 제안한 운영정책은 통합정책(IP; integration policy)과 권역정책(RP; regional policy)이다. 통합정책은 작업 발생 시, 빈 지게차를 발생한 작업에 할당하는 정책이다. 권역정책은 작업 발생 시, 발생한 작업이 속한 권역과 같은 권역에 속한 빈 지게차를 할당하는 정책이다. 이러한 정책은 우선순위 규칙을 적용하여 운영한다. 본 논문에서는 Kwon et al.(2014)에서 제안한 각 운영 정책 IP와 RP에서 각각 가장 좋은 결과(평균 작업대기시간, 평균 공차이동거리) 값을 비교 대상으로 한다. Kwon et al.(2014)에서는 작업 요청이 생길 경우 작업시간을 고려한 우선순위 규칙에서는 미리 작업 소요시간을 알고 있는 상태에서 지게차를 배차 한다. 그러나 본

연구에서는 작업을 끝낼 때까지 작업 소요시간을 알지 못하는 상태에서 지게차를 운영한다.

본 논문은 온라인기반으로 의사결정 시점마다 지게차에 작업을 배차한다. 제안한 방법론인 F¹, F^{1M}, F^{1MG}가 의사결정 시점에 배차 계획을 하는데 걸리는 시간은 0.002초, 0.003초, 0.027초로 매우 짧은 시간에 해를 도출한다고 볼 수 있다. 이는 제안한 방법론이 온라인 운영 방법론에 안정적으로 적용 가능함을 보여준다.

Fig. 4는 Kwon et al.(2014)의 결과와 본 논문에서 제안한 방법론의 평균 작업대기시간과 평균 공차이동거리의 비교 그래프이다. Kwon et al.(2014)의 통합정책은 평균 작업대기시간에서 권역정책은 평균 공차이동거리가 각각 낮은 것을 보여준다. 그러나 F^{1MG}와 F^{1M}의 경우 평균 작업대기시간과 평균 공차이동거리가 모두 낮다. 이는 동적인 상황에서는 배차만을 고려하는 것보다 계획수정을 함께 고려하는 것이 작업 대기시간과 공차이동거리를 동시에 감소시킬 수 있음을 보여준다. 또한, 제시된 방법론이 지게차운영에서 좀 더 안정적으로 적용 가능함을 확인시켜 준다.

상세한 비교 결과는 Table 4와 같다. 전체적으로 F^{1MG}가 타 방법론에 비해 좋은 성능을 보여준다. 그러나 평균 작업대기시간의 경우 F^{1MG}가 6.99분으로 Kwon et al.(2014)에서 제안한 IP¹의 6.97분보다 0.02초가량 낮다. 0.02초는 굉장히 작은 차이므로 본 논문에서 제안한 방법론이 지게차운영에서 좀 더 안정적으로 적용 가능함을 확인시켜 준다.

Table 4. Experiment result

	IP ¹	IP ²	RP ¹	RP ²	F ^I	F ^{IM}	F ^{IMW}
Average job waiting time (min.)	6.97	8.75	8.42	9.95	8.92	7.27	6.99
Average job waiting time standard deviation (min.)	11.49	15.63	14.43	18.99	17.08	15.41	9.58
Maximum waiting time (min.)	136.20	168.00	247.20	202.40	181.20	166.20	116.40
Average number of jobs waiting over 30 minutes	3596.90	5469.57	4836.00	6497.00	5700.50	4803.60	2832.20
Average number of jobs waiting over 1 hour	724.10	1715.57	1294.00	2501.00	2188.10	1745.90	233.30
Average number of jobs waiting over 2 hour	8.89	111.14	104.00	330.00	183.70	108.10	0.70
Average empty travel distance	740.49	704.96	715.27	606.77	725.41	549.18	417.69
Average empty travel distance standard deviation	839.71	824.67	687.63	670.49	856.69	492.92	406.86

절하게 처리하지 못하여 일부 작업의 대기시간이 길어졌음을 의미한다. 이것은 최대 대기시간, 2시간 이상 대기한 평균 작업의 개수 등과 같은 다른 지표를 통해 확인할 수 있다. F^{IMW} 같은 경우 작업의 최대대기시간이 116.40분으로 IP¹의 136.20분 보다 19.8분 줄어들어 들었다. 특히 2시간 이상 대기한 평균 작업의 개수는 F^{IMW}가 0.70개로 IP¹의 8.89개 보다 8.19개가 줄어들었다. 이는 F^{IMW}가 평균 작업대기시간은 비슷하지만, IP¹보다 더 적절하게 지게차가 배차될 수 있음을 보여준다.

평균 공차이동거리의 경우 본 논문에서 제안한 F^{IMW}와 F^{IM}이 417.69, 549.18로 Kwon et al.(2014)의 RP²의 606.77보다 10.49%와 45.27%의 개선률을 보여준다. 이는 Kwon et al.(2014)에서 평균 공차이동거리를 줄이기 위해 제안한 권역정책을 사용할 필요 없이 적절한 배차 방법론만으로도 충분히 지게차의 불필요한 운행을 줄일 수 있음을 확인시켜준다.

본 논문에서는 배차 범위에 따라 배차와 계획수정을 포함하는 배차계획을 한다. 이에 제안한 F^I, F^{IM}, F^{IMW}에서 Idle만을 고려하는 배차 범위 보다 Move를 포함하는 배차 범위가 기존의 배차계획이 수정될 수 있게 하므로 공차이동거리를 줄일 수 있을 것으로 예상하였다. 그리고 Work를 포함하는 배차 범위는 작업 완료 시간을 예상하여 지게차를 배차하므로 Move만을 포함한 배차범위 보다 불필요한 공차이동을 줄이고 작업대기시간도 함께 줄일 수 있을 것으로 예상하였다. Table 4에서 보여주는 F^I,

F^{IM}, F^{IMW}의 결과는 이를 확인시켜 주었으며 Move를 포함하는 배차 범위는 공차이동거리 뿐만 아니라 작업대기 시간도 함께 감소시킬 수 있음을 보여준다. 또한 Move를 포함하는 것은 계획 수정이 허용되는 것으로 동적인 상황에서는 배차만을 고려하는 것보다 계획수정을 허용하는 것이 작업 대기시간과 공차이동거리를 동시에 감소시킬 수 있음을 보여준다.

5. 결론

본 연구는 조선소 내에서의 지게차 운영 문제를 정의하고, 이를 해결하기 위하여 온라인 지게차 운영 알고리즘을 제안하였다. 지게차의 상태를 정의하고 전체 지게차 중 배차 대상이 되는 지게차를 선택하는 방법을 제시하였다. 그리고 다양한 지게차와 다수의 작업을 동시에 고려하였으며, 헝가리안 방법을 사용하여 배차 계획을 도출하였다. 배차 할당모형을 생성하는데 있어서 부족한 지게차 대수와 작업의 개수를 해결하기 위해 가상 지게차와 가상 작업을 생성하는 방법을 제시하였다. 또한, 시뮬레이션을 통해 기존 방법론보다 성능이 우수함을 보여줬으며, 기존 운영 정책 보다 제안한 방법론이 지게차 운영 환경에 더욱 적합함을 보였다. 계획수정을 포함한 배차계획이 보다 나은 결과를 도출할 수 있음을 확인시켰으며, 배차 범위에 따른 성능지표 차이가 존재함을 보여줬다.

그러나 제시한 방법론의 경우 비용할당을 구하는 데

있어서 지게차가 작업을 시작하는데 걸리는 시간만을 고려되었고, 비용 계산에 지게차의 허용용량은 전혀 고려되지 않았다. 이는 가장 무거운 물건을 들 수 있는 지게차가 가장 가벼운 물건을 작업하는 곳에 배치될 수 있게 하여 지게차 운영의 효율성을 떨어지게 한다. 그러므로 추후 연구로 지게차 허용용량을 고려한 비용계산 방법에 관한 연구가 요구된다.

본 방법론은 무게 제약이 있는 여러 가지 배차문제에 적용될 수 있을 것으로 기대됨에 따라, 다른 환경에도 적용 가능한 일반적인 알고리즘으로의 개발연구가 필요하다.

References

- Bilge, Ü., Esenduran, G., Varol, N., Öztürk, Z., Aydin, 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.
- Cho, K.K., Chung, K.H., Park, C., Park, J.C. and Kim, H.S., "A spatial scheduling system for block painting process in shipbuilding", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 50, No. 1, pp. 339-342, 2001.
- Confessore, G., Fabiano, F. 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.
- Dean, S.F., "Why the closest ambulance cannot be dispatched in an urban emergency medical services system", *Prehospital and Disaster Medicine*, Vol. 23, No. 2, pp. 161-165, 2008.
- Hayes, J., Moore, A., Benwell, G. and Wong, B., "Ambulance dispatch complexity and dispatcher decision strategies: implications for interface design", *Asia-Pacific Conference on Computer Human Interaction*, pp. 589-593, 2004.
- Han, C.K., Kwon, B.B., Kim, B.H., Jeong, R.G., Lee, H. and Ha, B.H., "An online personal rapid transit dispatching algorithm based on nearest neighbor dispatching rule", *Journal of the Korea Society for Simulation*, Vol. 23, No. 4, pp. 97-109, 2014.
- Han, C.K., Kim, B.H., Jeong, R.G. and Ha, B.H., "A dispatching and routing algorithm for personal rapid transit by considering congestion", *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 64, No. 11, pp. 1578-1586, 2015.
- Ho, Y.C. and Liu, H.C., "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.
- Ingmar, A., "Reallocation of empty PRT vehicles en route," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1838, 2003.
- Joo, C.M. and Kim, B.S., "Block transportation scheduling under delivery restriction in shipyard using meta-heuristic algorithms", *Expert Systems with Applications*, Vol. 41, No. 6, pp. 2851-2858, 2014.
- Koh, S.G., Park, J.C., Choi, Y.S. and Joo, C.M., "Development of a block assembly scheduling system for shipbuilding company", *IE Interfaces*, Vol. 12, No. 4, pp. 586-594, 1999.
- Koh, S.G., Jang, J.H., Choi, D.W. and Woo, S.B., "Spatial scheduling for mega-block assembly yard in shipbuilding company", *IE interfaces*, Vol. 24, No. 1, pp. 78-86, 2011.
- Kwon, B.B., Han, C.K., Son, J.R. and Ha, B.H., "A simulation model for evaluating forklift dispatching policies in shipyard", *The 1st East Asia Workshop on Industrial Engineering*, 2014.
- Lee, W.S., Lim, W.I. and Koo, P.H., "Transporter scheduling based on a network flow model under a dynamic block transportation environment", *Computers & Industrial Engineering*, 2009. *CIE 2009. International Conference on*, pp. 311-316, 2009.
- Lees-Miller, J.D., "Empty vehicle redistribution for personal rapid transit", *Ph.D Thesis, Bristol University*, 2011.
- Lee, S., "The role of centrality in ambulance dispatching", *Decision Support Systems*, Vol. 54, No. 1, pp. 282-291, 2012.
- Park, C. and Seo, J.A., "GRASP approach to transporter scheduling and routing at a shipyard", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 63, No. 2, pp. 390-399, 2012.
- Roh, M.I. and Cha, J.H.A., "block transportation scheduling system considering a minimization of travel distance without loading of and interference

between multiple transporters”, International journal of production research, Vol. 49, No. 11, pp. 3231-3250, 2011.

Savelsbergh, M.W.P., “Local Search in Routing Problems with Time Windows”, Annals of Operations research Vol. 4, No. 1, pp. 285-305, 1985.

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.



권 보 배 (hajibin@pusan.ac.kr)

2007 동양대학교 산업공학과 학사
2009~ 현재 부산대학교 산업공학과 석박사통합과정

관심분야 : 시뮬레이션 방법론, 스케줄링



손 정 열 (jilson@dsme.co.kr)

1998 부산대학교 산업공학과 학사
2000 부산대학교 산업공학과 석사
2014 부산대학교 산업공학과 박사
2002~ 현재 대우조선해양 차장

관심분야 : 인공지능, 시뮬레이션, 생산자동화, 빅데이터



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