

자동화 컨테이너 터미널의 복수 규칙 기반 AGV 배차전략 최적화

김정민* · 최이** · 박태진*** · † 류광렬

*,**,*** 부산대학교 대학원, † 부산대학교 컴퓨터공학과 교수

Optimizing dispatching strategy based on multicriteria heuristics for AGVs in automated container terminal

Jeongmin Kim* · Ri Choe** · Taejin Park*** · † Kwang Ryul Ryu

*,**,*** Graduate school of Pusan National University, Busan 609-735, Korea

† Department of Computer Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

요 약 : 본 논문은 컨테이너 운송을 위한 AGV(Automated Guided Vehicle) 배차 전략을 대상으로 한다. AGV 배차 문제는 안벽 크레인의 대기 시간과 AGV의 주행 거리를 최소화하도록 AGV에 작업을 할당하는 것이 목표이다. 터미널 환경의 동적인 특성으로 인해 계획 결과의 정확한 예측이 어렵고 수정이 빈번하기 때문에 실무에서는 의사결정 시간이 짧은 단순 규칙 기반 배차가 많이 쓰인다. 그러나 단순 규칙 기반 배차는 근시안적 특성으로 인해 배차의 다양한 성능 지표를 만족시키지 못하는 한계가 있으며 이를 극복하기 위해 본 논문에서는 복수 규칙 기반의 배차 전략을 제안한다. 복수 휴리스틱 기반 배차 전략은 여러 규칙의 가중합으로 구성되며 규칙 사이의 가중치를 최적화하기 위해 다목적 진화 알고리즘을 적용하였다. 시뮬레이션 실험을 통해 제안 방안이 기존 단일 규칙 기반 배차에 비해 더 좋은 성능을 보임을 확인하였다.

핵심용어 : 자동화 컨테이너 터미널, 무인 자동화 차량, 배차 전략, 다목적 진화 알고리즘, 복수 규칙

Abstract : This paper focuses on dispatching strategy for AGVs(Automated Guided Vehicle). The goal of AGV dispatching is assigning AGVs to requested job to minimizing the delay of QCs and the travel distance of AGVs. Due to the high dynamic nature of container terminal environment, the effect of dispatching is hard to predict thus it leads to frequent modification of dispatching decisions. In this situation, approaches based on a single rule are widely used due to its simplicity and small computational cost. However, these approaches have a limitation that cannot guarantee a satisfactory performance for the various performance measures. In this paper, dispatching strategy based on multicriteria heuristics is proposed. The Proposed strategy consists of multiple decision criteria. A multi-objective evolutionary algorithm is applied to optimize weights of those criteria. The result of simulation experiment shows that the proposed approach outperforms single rule-based dispatching approaches.

Key words : Automated container terminal, Automated Guided Vehicle, Dispatching strategy, Multi-objective evolutionary algorithm, Multicriteria heuristics

1. 서 론

최근 세계의 항만 컨테이너 물동량은 꾸준히 증가하는 추세를 보이고 있다. 네덜란드, 독일, 일본과 같은 항만 선진국에서는 늘어나는 물류 수요를 효율적으로 처리하고, 운영비용을 줄이기 위해 터미널 장비를 자동화하려는 노력을 기울이고 있다. AGV(Automated Guided Vehicle)는 이러한 자동화 장비의 일종으로 컨테이너선에서 컨테이너를 싣거나 내리는 QC(Quay Crane)와 터미널 내 컨테이너 임시 저장하는 장치장 사이를 이동하면서 컨테이너를 전달하는 역할을 한다.

컨테이너 터미널의 생산성을 높이려면 컨테이너선과 직접 컨테이너를 주고받는 QC가 효율적으로 작업할 수 있어야 한

다. QC가 효율적으로 작업하기 위해서는 AGV가 제 시간에 필요한 위치에 컨테이너를 운반함으로써 QC가 대기하는 시간을 최소화하여야 한다. 그러나 컨테이너 운반에 사용 가능한 AGV의 수는 유지비용과 교통체증의 요인에 의해 일정 수 이하로 제한된다. 따라서 제한된 수의 AGV로 컨테이너를 효율적으로 전달하기 위한 AGV의 운영이 필요하다. AGV 운영 문제는 본 논문에서는 AGV 운영 문제 중 AGV에 작업하고자 하는 컨테이너를 할당하는 배차 문제를 대상으로 한다.

배차 문제에 대한 기존 연구에 대하여 살펴보면 다음과 같다. Bish(1999)는 배차 문제가 NP-hard 문제라는 것을 보이고 문제를 해결하기 위해 단순 규칙 기반의 배차 방법을 사용하였다. 단순 규칙 기반 AGV는 전략은 직관적이고 계산량이 적

* 대표저자 : 연회원, jeongminkim.islab@gmail.com 051)510-3645
** 연회원, choilee@pusan.ac.kr 051)510-3645
*** 연회원, parktj@pusan.ac.kr 051)510-3531
† 교신저자 : 종신회원, krryu@pusan.ac.kr 051)510-2453

다는 장점이 있어 실무에서 많이 사용되고 있다. 하지만 단일 규칙 기반 전략은 그 근시안적인 특성으로 인해 배차 전략의 다양한 성능 지표를 동시에 만족시키기 어렵다는 단점이 있다. 이에 Naso와 Turchiano(2005)는 복수 규칙 기반의 AGV 배차전략을 제안하였으나 자동화 공장을 대상으로 한 연구로 공장 상황은 상황의 변화가 적어 이를 그대로 자동화 터미널에 적용하기는 어렵다. 따라서 자동화 터미널에 적용 가능한 AGV 배차전략 연구가 필요하다.

본 논문에서는 이러한 단일 규칙 기반 배차전략의 한계를 극복하기 위해 자동화 컨테이너 터미널에 적용 가능한 복수 규칙 기반의 배차전략을 제안한다. 배차전략 방안은 여러 개의 단일 규칙을 가중합 형태로 취합하여 후보 작업의 적합성을 평가한다. 배차전략 최적화를 위해 배차 규칙의 가중치를 다목적 진화 알고리즘을 이용하여 탐색한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 AGV가 작업하는 자동화 컨테이너 터미널 환경과 AGV의 작업 흐름에 대해서 살펴보고 3장에서는 AGV 배차 문제를 해결하기 위한 복수 규칙 기반 배차전략에 대해서 살펴본다. 4장에서는 배차전략의 효율성을 검증하기 위한 실험과 실험 결과에 대해서 알아본 후 5장에서 결론을 맺는다.

2. 자동화 컨테이너 터미널과 AGV의 작업 흐름

본 장에서는 AGV가 작업하는 환경인 자동화 컨테이너 터미널의 구성과 AGV의 작업 흐름에 대해서 살펴본다.

2.1 자동화 컨테이너 터미널

본 논문에서는 수직 자동화 컨테이너 터미널에 대해서 다루고 있다. 수직 자동화 컨테이너 터미널은 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 크게 안벽과 에이프런, 장치장으로 구성되어 있다. 안벽은 컨테이너 선박이 배를 정박하면서 안벽 크레인과 컨테이너를 교환하는 곳이다. 에이프런은 안벽과 장치장 사이에서 차량이 실제로 주행하는 구간으로 TP(Transfer Point)가 할당되지 않은 차량이 대기하는 대기영역을 포함하고 있다. 장치

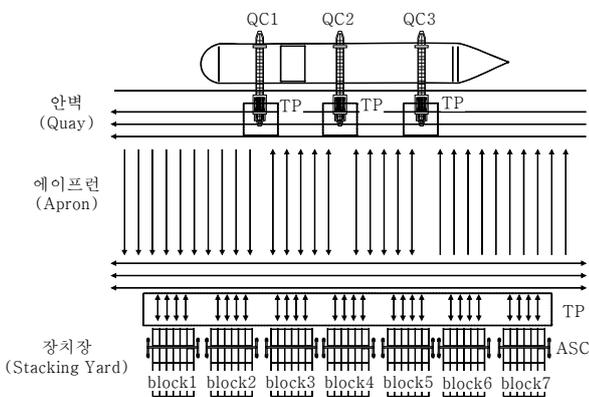


Fig. 1 The layout of an automated container terminal

장은 선박에서 들어온 수입 컨테이너나 선박으로 보낼 수출 컨테이너를 임시로 저장하는 곳으로 여러 개의 블록으로 구성되어 있으며 각 블록에는 ASC(Automated Stacking Crane)가 있어 ASC를 통해 컨테이너의 적재가 이루어진다.

2.2 AGV의 작업 흐름

AGV가 수행하는 작업은 양하된 수입 컨테이너를 장치장으로 운반하는 작업과 수출 컨테이너를 적하하기 위해 안벽으로 운반하는 작업으로 나누어진다. 각 작업의 작업 흐름은 다음과 같다. 먼저 양하 작업은 AGV가 수입 컨테이너를 받기 위해서 에이프런상의 대기 영역에서 기다리다가 목적지 안벽에 TP가 확보되면 안벽으로 이동하여 컨테이너를 받을 준비를 한다. AGV가 안벽으로 도착한 것을 확인하면 QC는 선박에서 컨테이너를 가져와 AGV에 컨테이너를 전달한다. 컨테이너를 받은 AGV는 컨테이너를 적재할 블록이 결정되면 해당 블록에 TP가 비었는지를 확인하고 TP가 확보되면 에이프런을 거쳐 목표 블록으로 이동한다. 블록에 도착한 AGV는 ASC가 도착하기를 기다리고 ASC가 도착하면 ASC가 컨테이너를 집어 장치장에 적재함으로써 작업이 끝난다. 적하 작업은 AGV가 수출 컨테이너를 받기 위해서 목표 블록에 TP가 할당되기를 기다리다가 작업 공간이 할당되면 블록으로 이동하여 ASC가 도착하기를 기다린다. ASC가 도착하면 컨테이너를 넘겨받고 에이프런상의 대기 지점으로 이동한다. 대기 지점에서 목적지 안벽의 TP가 비는 것을 기다렸다가 TP가 확보되면 목적지 안벽으로 이동하여 QC의 도착을 기다린다. QC가 도착하면 QC가 AGV에게서 컨테이너를 집어서 선박에 적재함으로써 적하 작업이 끝난다.

3. 복수 규칙 기반 AGV 배차 알고리즘

일반적으로 AGV의 배차 방식은 차량 발주 방식과 작업 발주 방식으로 나뉜다. 차량 발주 방식은 작업을 마치고 대기 중인 AGV가 작업 가능한 목록 중 하나의 작업을 선택하는 방식이고, 작업 발주 방식은 배차가 필요한 작업이 발생했을 때 작업을 수행할 차량을 선택하는 방식이다. 본 논문에서는 작업 할당 시점이 비교적 명확한 차량 발주 방식을 사용하였다.

제안 알고리즘은 차량 발주 방식을 기반으로 QC 작업 계획에 있는 후보 작업에 대해 배차전략을 이용하여 평가 값을 매긴 후 가장 평가 값이 좋은 작업을 선택하여 작업을 수행한다. 본 장에서는 배차전략과 배차전략을 구성하는 배차규칙에 대해서 설명한 후 다목적 진화 알고리즘을 이용한 배차전략 최적화 방안에 대하여 소개한다.

3.1 배차규칙과 배차전략

배차전략을 구성하는 배차규칙은 Table 1에 나타나 있듯 총 6가지로 정의하였고 배차전략은 식(1)과 같이 각 배차규칙의 가중합 형태로 정의하였다. 또한 각 규칙별로 평가 값의 범

위가 다르기 때문에 각 규칙별로 균형 있는 비중을 가지기 위해서는 평가 값의 정규화가 필요하다. Fig. 2는 이러한 평가 값들을 퍼지 논리를 이용하여 0에서 1사이의 값으로 정규화하는 모습을 보여준다. 정규화 시 각 규칙별로 지정된 $[L_i, U_i]$ 내의 범위 $[a_i, b_i]$ 를 기준으로 a_i 보다 작은 값은 최소값으로, b_i 보다 큰 값은 최대값으로 보고 $[a_i, b_i]$ 사이의 값에 대해서는 Fig. 2의 식을 적용하여 정규화를 수행한다. 퍼지 논리를 이용하면 규칙별로 지정된 범위를 넘는 값을 범위 내의 값으로 변환하여 처리하므로 하나의 규칙의 평가 값이 극단적인 경우에도 다른 규칙에 대하여 충분한 고려가 이루어지는 효과가 있다.

배차전략을 구성하는 각 규칙들의 평가 방법과 목적에 대하여 살펴보면 다음과 같다.

$$f = \sum_{i=1}^6 w_i r_i \quad (1)$$

Table 1 Dispatching rules

규칙	설명
R_1	작업 우선순위가 높은 작업 선호
R_2	다른 차량에 비해 목적지에 도착 가능한 시간의 차이가 큰 작업 선호
R_3	컨테이너를 빨리 받을 수 있는 작업 선호
R_4	무부하 주행 거리가 짧은 작업 선호
R_5	부하 주행 거리가 긴 작업 선호
R_6	QC의 평균 대기시간이 긴 작업 선호

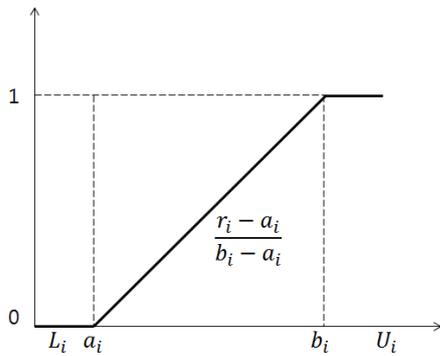


Fig. 2 Normalization of evaluation value

1) 작업 우선순위가 높은 작업 선호(규칙1)

작업 우선순위가 높은 작업을 선호하는 규칙은 식(2)와 같이 정의한다. j_i 는 평가할 대상 작업을 나타내며, p_i 는 0부터 시작하는 작업의 우선순위를 나타낸다. 숫자가 작을수록 우선순위가 더 높은 작업을 뜻한다. C 는 후보 작업의 집합을 나타내며 j_k 는 후보 작업 집합 C 에 속하는 작업이다. 즉, 후보 작업의 집합에서 가장 우선순위가 높은 작업과 현재 작업과 우선순위가 얼마나 차이 나는지를 구하는 평가 규칙이다. QC

작업은 작업계획의 우선순위를 따라 처리되기 때문에 작업 상황에 관계없이 중요성을 갖는 규칙이다.

$$r_1(j_i) = p_i - \min_{j_k \in C} p_{j_k} \quad (2)$$

2) 다른 차량에 비해 목적지에 도착 가능한 시간 차이가 큰 작업 선호(규칙2)

다른 차량에 비해 목적지에 도착 가능한 시간 차이가 큰 작업을 선호하는 규칙은 식(3)과 같이 정의한다. T_{ET} 는 차량이 어떤 작업의 무부하 주행을 수행하는데 걸리는 시간을 뜻한다. v_j 는 현재 작업을 할당받을 차량을 나타내며, V 는 전체 차량의 집합을 나타내고 T_{JF} 는 현재 작업을 수행중인 차량이 작업을 마치는데 걸리는 예상 시간을 나타낸다. 즉, 현재 작업을 할당 받을 차량이 목적지에 도착하기 위해 걸리는 시간과 현재 작업을 할당 받을 차량을 제외한 다른 차량이 수행중인 작업을 마치고 목적지까지 도착하기에 걸리는 예상 시간의 차이를 구하는 평가 규칙이다. 이 평가 규칙을 통해 가장 좋은 평가를 받는 작업은 차량의 전체 주행 거리를 감소시킬 수 있는 작업이 된다.

$$r_2(j_i) = T_{ET}(v_j, j_i) - \min_{v_k \in V \setminus \{v_j\}} (T_{JF}(v_k) + T_{ET}(v_k, j_i)) \quad (3)$$

3) 컨테이너를 빨리 받을 수 있는 작업 선호(규칙3)

컨테이너를 빨리 받을 수 있는 작업을 선호하는 규칙은 식(4)와 같이 정의할 수 있다. Q 는 j_i 작업의 컨테이너를 작업할 크레인 Cr_i 가 먼저 처리해야 하는 작업의 집합이다. j_q 는 Q 에 속하는 작업을 나타내며 T_{JF} 는 현재 작업을 수행중인 크레인이 작업을 마치는데 걸리는 예상 시간을 나타낸다. 또한 T_{JR} 은 크레인이 처리할 작업의 컨테이너를 싣고 TP까지 이동하는데 걸리는 예상 시간을 나타낸다. 즉, 현재 후보 작업을 처리할 크레인이 먼저 처리해야 할 작업을 마치고 현재 작업의 컨테이너를 싣고 TP에 도착하기까지의 시간을 구하는 평가 규칙이다. 이 평가 규칙을 통해 크레인에 대기 작업이 많은 경우 작업이 선택될 확률이 줄어들어 크레인 작업이 한 쪽으로 몰리는 것을 막을 것이라 기대할 수 있다.

$$r_3(j_i) = \sum_{j_q \in Q} T_{JF}(Cr_i, j_q) + T_{JR}(Cr_i, j_i) \quad (4)$$

4) 무부하 주행 거리가 짧은 작업 선호(규칙4)

무부하 주행 거리가 짧은 작업을 선호하는 규칙은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다. D_{ET} 는 해당 작업의 무부하 주행 거리를 나타낸다. 규칙2와 마찬가지로 차량의 주행 거리 감소를 기대할 수 있는 평가 규칙이며 규칙2가 차량 전체의 주행 거리 최적화에 중점을 두었다면 이 규칙은 차량 각각의 주행 거리 최적화에 중점을 두고 있다는 차이가 있다.

$$r_4(j_i) = D_{ET}(j_i) \quad (5)$$

5) 부하 주행 거리가 긴 작업 선호(규칙5)

부하 주행 거리가 긴 작업을 선호하는 규칙은 식(6)와 같이 나타낼 수 있다. D_{LT} 는 해당 작업의 부하 주행 거리를 나타낸다. 앞에 마이너스 기호가 붙었기 때문에 부하 주행 거리가 길수록 더 좋은 평가 값을 받게 된다. 부하 주행 거리가 길수록 목적지 크레인은 더 많은 시간을 기다려야 하므로 작업 처리 지연이 심해질 가능성이 있다. 따라서 해당 크레인에 더 많은 작업을 할당하여 크레인의 대기 시간을 줄이는 것을 목적으로 한다.

$$r_5(j_i) = -D_{LT}(j_i) \tag{6}$$

6) QC의 평균 대기시간이 긴 작업 선호(규칙6)

QC의 평균 대기시간이 긴 작업을 선호하는 규칙은 식(7)과 같이 정의한다. T_D 는 작업을 수행할 QC가 지금까지 대기한 시간의 총합을 나타낸다. 이 값을 QC가 지금까지 처리한 작업의 수 J_P 로 나누면 QC의 평균 대기시간이 된다. QC의 평균 대기시간이 길다는 것은 그만큼 컨테이너가 제때 도착하지 않았다는 의미이므로 대기시간이 긴 QC에 더 많은 작업을 할당하여 QC가 기다리는 시간을 줄이는 것을 목적으로 한다.

$$r_6(j_i) = -\frac{T_D(QC_i)}{|J_P(QC_i)|} \tag{7}$$

3.2 배차전략 최적화

복수 규칙 기반의 배차전략에서는 배차규칙들의 가중합 형태로 후보 작업에 대한 평가 값을 매기기 때문에 각 규칙의 가중치 설정이 배차전략의 성능에 큰 영향을 미친다. 그러나 배차전략의 최적의 가중치는 직관적으로 결정하기 어렵다. 마찬가지로, 퍼지 논리를 이용하여 각 규칙별 평가 값을 정규화하는데 있어 $[a_i, b_i]$ 의 범위도 각 규칙별 가중치에 영향을 주어 배차 성능에 영향을 미치는 요소이지만 적절한 범위가 규칙별로 다르고 작업 상황과 터미널 환경에 의존적이기 때문에 직관적으로 결정하기 어렵다. 따라서 탐색 알고리즘을 이용하여 규칙별 최적의 가중치와 정규화를 적용할 평가 값의 범위를 찾는다.

배차 문제는 터미널의 생산성 향상을 위한 QC의 대기 시간 최소화와 운용비용 감소를 위한 AGV 주행 거리 최소화라는 두 가지 목표를 가지고 있다. 그런데 AGV에 작업을 할당하는 과정에서 QC의 대기시간이 길었던 작업이 AGV로부터 먼 거리에 있어 QC의 대기시간을 줄이기 위해서 AGV의 주행 거리가 더 긴 작업을 선택하는 등 한 쪽의 목표를 만족하기 위해 다른 쪽의 목표에서 손해가 되는 경우가 발생하게 된다. 따라서 일반적인 탐색 알고리즘으로 하나의 목표에 가지고 최적 가중치를 구하는 경우 두 가지 목표에 대한 고려가 제대로 이루어지기 어렵다. 이를 극복하기 위하여 목표 자체를 두 목표들의 가중합 형태로 정의하여 탐색을 수행하는 방법도 있으나

이 경우 두 목표 사이의 가중치를 구하는 것 또한 하나의 문제가 된다.

두 가지 목표를 모두 고려하면서 상황에 맞는 다양한 해를 구하기 위한 탐색 방법으로 다목적 진화 알고리즘을 사용하였으며, 그 중에서 널리 사용되는 NSGA-II(Non-dominated Sorting Genetic algorithm-II) 알고리즘을 이용하였다. NSGA-II 알고리즘은 Deb 외 3인(2002)이 제안한 알고리즘으로 빠른 비지배 분류(fast non-dominated sorting)과 밀집도 거리 할당(crowding distance assignment)를 통해 우수한 해를 찾으면서도 해들 사이에 다양성을 유지해나가는 특성이 있다.

NSGA-II 알고리즘을 이용하여 배차전략을 탐색하기 위해서는 배차전략을 문제의 해로서 표현하여야 한다. 탐색하고자 하는 해에 대한 표현은 Fig. 3과 같이 규칙별로 각 규칙에 대한 가중치와 퍼지 논리 집합에서 정규화를 적용할 평가 값의 범위로 구성되어 있다. 각 규칙별 가중치는 규칙 별 작업 선호 양상이 상황에 따라 반대로 적용되는 경우도 있기 때문에 가중치의 탐색 범위를 -1에서 1사이의 실수 값으로 하였다. 퍼지 논리 집합에서 정규화를 적용할 평가 값의 범위는 규칙별 하한, 상한 값인 $[L_i, U_i]$ 내에서 결정되는데, $[L_i, U_i]$ 값은 평가 값의 분포를 고려하여 결정되며, 이는 터미널 환경과 작업 상황에 따라 달라질 수 있다.

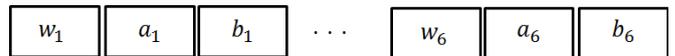


Fig. 3 Solution of dispatching strategy

4. 실험 및 결과

4.1 실험 환경 설정

복수 규칙 기반의 배차전략과 단일 규칙 기반 배차전략의 성능 비교를 위해 Table 2와 같이 터미널 환경을 설정하였다.

Table 2 Terminal Environment

설정 요소	설정 값
장치장 블록	7개 / 14개
안벽 크레인	3대 / 6대
선석	선박 1대 정박 / 선박 2대 정박
작업 물량	3,000개 컨테이너 (양하 1,500개, 적하 1,500개)
AGV	6대 / 9대 / 12대 / 15대

복합 규칙 기반 배차전략의 탐색을 위하여 3.2절에서 서술한 NSGA-II 알고리즘을 사용하였다. 알고리즘 적용 시 사용한 설정 값은 Table 4와 같다. 개체군 크기는 문제의 복잡성을 고려하여 100개로 정하였고, 결정 변수는 3.2절에서 서술한 바와 같이 18개의 실수로 구성되어 있다. 목적 함수는 QC 평균 대기시간과 AGV 주행거리 최소화를 목적으로 하였다. QC

평균 대기시간은 식 (8)와 같이 정의한다. T_{RD} 는 QC가 안벽에 도착한 시각을 나타내며, T_{AR} 은 컨테이너를 가진 AGV에 QC에 도착한 시각을, J_P 는 처리한 작업의 집합이다. 즉, QC가 안벽에 도착한 후 AGV에 안벽에 도착하기까지 걸린 평균 시간이 된다. AGV의 주행거리는 식 (9)과 같이 정의한다. D 는 각 차량의 주행 거리를 나타내며, 총 주행거리는 각 차량의 주행 거리의 총합으로 정의한다.

$$T_{QW} = \frac{\sum_{q \in Q} \sum_{j \in J(q)} T_{AR}(q,j) - T_{RD}(q,j)}{|J_P|} \quad (8)$$

$$D = \sum_{v \in V} D(v) \quad (9)$$

각 규칙사이의 평가 값의 정규화를 위해 정의된 각 규칙별 퍼지 논리 집합의 평가 값의 탐색 범위 $[L_i, U_i]$ 는 Table 3과 같이 설정하였다. 규칙 1의 탐색 범위는 안벽 크레인 수 3대를 기준으로 설정하였고, 규칙 2, 4, 5의 경우 1개 선석을 기준으로 너비가 약 300m, 장치장과 안벽 사이의 거리가 약 150m임을 고려하여 최대 주행거리와 주행시간을 계산하여 설정하였다. 규칙 3, 6의 경우는 QC의 목표 처리시간을 2분 정도로 보고 그 값을 기준으로 탐색 범위를 설정하였다.

Table 3 Search range of fuzzy logic for each rules

규칙 1	규칙 2	규칙 3	규칙 4	규칙 5	규칙 6
[0, 9]	[-60, 60]	[0, 360]	[0, 400]	[-400, 0]	[-30, 0]

총 시뮬레이션 횟수는 30,000번으로 설정하였다. 한 번의 시뮬레이션에 약 10초가 소요되기 때문에 탐색 시간 단축을 위하여 탐색에서는 3,000개의 작업이 아닌 500개(약하 250개, 적하 250개)의 작업만 가지고 터미널 시뮬레이터를 이용하여 탐색을 수행하였다. 개체 선택 방법으로는 토너먼트 기반 선택 방법을 선택하였고, 결정 변수가 실수이기 때문에 교배 및 돌연변이 연산자에는 실수에 적용 가능한 Simulated binary crossover와 Polynomial mutation을 사용하였다.

Table 4 NSGA-II Settings

설정 요소	설정 값
개체군 크기	100
결정 변수	18개(실수값)
목적 함수	2개(QC 평균 대기시간, AGV 주행거리)
시뮬레이션 수	30,000번(300세대)
개체 선택 방법	토너먼트 기반 선택
교배 연산자	Simulated binary crossover
돌연변이 연산자	Polynomial mutation

4.2 실험 내용과 결과 분석

탐색된 복합 규칙 배차전략의 평가에는 다양한 상황에서의 배차전략 평가를 위해 3가지 터미널 상황을 만들었다. 첫 번째 상황은 장치장 블록별 작업 부하가 균일한 상황으로 일반적으로 가장 흔히 볼 수 있는 상황이다. 두 번째 상황은 특정 장치장 블록에 작업이 몰리는 상황을 가정하였고, 마지막으로 작업별 차량 이동거리가 불균일하여 차량 혼잡이 발생하기 쉬운 상황을 가정하였다. 이러한 3가지 상황에 더불어 작업에 투입되는 AGV의 수가 부족한 상황(6대)에서 충분한 상황(15대)을 가정하였다. 가정한 각 상황별로 상황에 최적화된 복합 규칙 배차전략을 탐색하였다. 탐색된 각 상황별 복합 규칙 기반 배차전략과 단순 배차전략의 성능 비교를 위해 상황별 평가에서는 각 상황별로 5개의 QC 작업 계획을 생성하였고 각 작업 계획 별로 10번의 시뮬레이션을 수행하여 하나의 상황별 총 50번의 시뮬레이션을 수행하였다. 각 상황별 실험 결과는 Table 5, 6, 7에 나타나 있다. 각 Table의 실험 결과는 상황별로 복합 규칙 기반 전략의 결과와 단일 규칙 기반 전략의 결과 중 QC 대기시간이 가장 짧았던 전략과 AGV 총 주행거리가 가장 짧았던 전략 2개를 가지고 QC 대기시간과 차량의 총 주행거리를 비교하였다.

장치장 블록별 작업 부하가 균일한 상황에서는 작업에 투입된 AGV의 수가 부족한 경우 규칙 6(QC 평균 대기시간이긴 작업 선호 규칙)이 가장 짧은 QC 대기시간을 보였으나 차량의 총 주행거리 측면에서는 복합 규칙과 비교하여 약 100km 정도 더 긴 주행거리의 차이를 보였다. 반면 규칙 2(다른 차량에 비해 목적 시간에 도착 가능한 시간 차이가 큰 작업 선호)는 주행거리 면에서는 복합 규칙기반 전략과 비슷한 성능을 보였으나 QC 대기시간에서 복합 규칙기반 전략과 18초 정도로 큰 차이를 보였다. 작업에 투입되는 AGV 수가 늘어나면서 전체적으로 QC 대기시간은 감소하는 추세를 보였으며, 규칙 1(작업 우선순위가 높은 작업 선호 규칙)이 가장 낮은 안벽 크레인 평균 대기시간을 보였고 복합 규칙이 같거나 약 1%정도 더 긴 대기시간을 보여주었다. 하지만 차량의 총 주행거리 측면에서는 비슷한 양상을 보여주었다.

장치장 블록별 작업 부하가 불균일한 상황에서는 안벽 크레인의 평균 대기시간이 조금씩 증가하였고 균일 상황과 마찬가지로 차량 수가 늘어나면서 QC 대기시간이 점차 감소하는 양상을 보였다. 차량의 총 주행거리는 약 70km정도 감소하였다. 이는 작업들의 이동거리가 짧은 대신 부하가 집중되는 상황의 특성을 반영한 것으로 보인다. 규칙별 성능 차이는 작업 부하가 균일한 상황과 비슷한 양상을 보였다.

작업별 차량 이동거리가 불균일한 상황에서는 장치장 블록별 작업 부하가 균일한 상황에 비해 안벽 크레인의 대기 시간과 평균 주행거리가 모두 증가하였다. 이동거리 불균형으로 인한 교통 정체가 성능에 영향을 미친 것으로 보인다. 규칙별 성능 차이는 위 두 상황과 비슷한 양상을 보였다.

Table 5 Quay crane average delay and AGV total travel distance on even workload distribution for each yard blocks

차량 수	QC 대기시간(초)			차량 총 주행거리(km)		
	복합	단일		복합	단일	
6대	72.6 (3위)	64.2 (규칙6)	90.5 (규칙2)	1188 (1위)	1286 (규칙6)	1196 (규칙2)
9대	47.4 (2위)	47.2 (규칙1)	60.9 (규칙2)	1196 (2위)	1277 (규칙1)	1188 (규칙2)
12대	35.2 (2위)	35.0 (규칙1)	48.0 (규칙2)	1204 (2위)	1285 (규칙1)	1180 (규칙2)
15대	31.4 (1위)	31.4 (규칙1)	43 (규칙2)	1198 (2위)	1241 (규칙1)	1187 (규칙2)

Table 6 Quay crane average delay and AGV total travel distance on uneven workload distribution for each yard blocks

차량 수	QC 대기시간(초)			차량 총 주행거리(km)		
	복합	단일		복합	단일	
6대	73.2 (2위)	61.8 (규칙6)	92.1 (규칙2)	1135 (2위)	1195 (규칙6)	1132 (규칙2)
9대	49.9 (2위)	49.3 (규칙1)	61.8 (규칙2)	1126 (2위)	1198 (규칙1)	1119 (규칙2)
12대	49.5 (2위)	49.2 (규칙1)	59.6 (규칙2)	1157 (2위)	1198 (규칙1)	1122 (규칙2)
15대	37.7 (1위)	37.8 (규칙1)	42.2 (규칙2)	1138 (2위)	1185 (규칙1)	1120 (규칙2)

Table 7 Quay crane average delay and AGV total travel distance on uneven travel distance distribution for each jobs

차량 수	QC 대기시간(초)			차량 총 주행거리(km)		
	복합	단일		복합	단일	
6대	76.3 (3위)	56.6 (규칙6)	97.1 (규칙2)	1242 (1위)	1379 (규칙6)	1267 (규칙2)
9대	51.8 (2위)	51.1 (규칙1)	69.6 (규칙2)	1238 (1위)	1321 (규칙1)	1252 (규칙2)
12대	39.7 (2위)	39.4 (규칙1)	57.1 (규칙2)	1248 (1위)	1329 (규칙1)	1252 (규칙2)
15대	37.2 (1위)	37.4 (규칙1)	50.9 (규칙2)	1259 (2위)	1345 (규칙1)	1250 (규칙2)

Table 8에서는 2개의 선석을 대상으로 터미널 규모를 QC 6대, 14개의 장치장 블록, 18대의 AGV로 확장하여 복합 규칙 기반 전략과 단일 규칙 기반 전략의 성능을 비교하였다. 대상 터미널의 규모가 커지면서 차량의 총 주행거리가 상황별로 300~600km까지 증가하였고, 이에 따라 차량 주행거리 최적

화에 연관된 규칙 2나 규칙 4의 성능이 크게 향상되었음을 확인할 수 있다. 복합 규칙 기반 전략은 균일한 상황과 블록 부하가 불균일한 상황에서는 비교적 균형 잡힌 성능을 보여주었으나 작업별 차량 이동거리가 불균일한 상황에서는 다른 규칙과 비교 시 양호한 성능을 보였으나 규칙 4와 비교하여 QC 대기시간과 차량 총 주행거리에서 모두 떨어지는 양상을 보였다. 이는 이동거리가 증가하고 이에 따라 교통 흐름이 복잡해지면서 제한된 양의 작업(500개)을 기반으로 한 시뮬레이션에서는 전략의 평가가 제대로 이루어지지 않은 것으로 보인다.

Table 9에서는 1개의 선석을 대상으로 복합 규칙 기반의 전략 탐색 시 목적 함수를 QC 대기시간 최소화 하나만으로 하는 경우의 성능을 두 가지 상황에서 비교하였다. 두 가지 상황 모두 목적 함수를 QC 대기시간 최소화와 차량 총 주행거리 최소화로 하는 경우에 QC 대기시간과 차량 총 주행거리에서 더 나은 성능을 보였다. 이는 목적 함수를 2개로 하는 경우가 해의 다양성을 유지하는 데 있어 더 유리하기 때문에 더 나은 탐색 결과를 보인 것으로 보인다.

전체 결과를 종합해보면 복합 규칙 기반 배차전략은 단순 규칙 기반 배차전략과 비교하여 대부분의 상황에서 비슷한 안벽 크레인 평균 대기시간을 가지면서도 좀 더 차량의 효율적인 운용이 가능하다는 것을 확인하였다.

복합 규칙 기반의 배차전략의 성능은 배차전략을 구성하는 배차 규칙, 배차전략 탐색을 위한 설정에 영향을 받기 때문에 이러한 요소들에 대한 최적화가 이루어진다면 더 나은 성능을 기대할 수 있을 것이다.

Table 8 Quay crane average delay and AGV total travel distance on 6 QCs, 14 Blocks and 18 AGVs

규칙	QC 대기시간(초)			차량 총 주행거리(km)		
	복합	단일		복합	단일	
균일	29.5 (3위)	26.4 (규칙4)	30.8 (규칙2)	1521 (1위)	1562 (규칙4)	1561 (규칙2)
블록 부하 불균일	27.5 (2위)	26.4 (규칙1)	28.1 (규칙2)	1294 (4위)	1609 (규칙1)	1231 (규칙2)
이동거리 불균일	42.6 (6위)	27.7 (규칙4)	29.9 (규칙1)	1929 (3위)	1849 (규칙4)	2113 (규칙1)

Table 9 Quay crane average delay and AGV total travel distance on 3 QCs and 7 Blocks and 9 AGVs. Comparison with single objective based strategy

규칙	QC 대기시간(초)		차량 총 주행거리(km)	
	복합 목적함수	단일 목적함수	복합 목적함수	단일 목적함수
균일	50.0	67.7	1204	1285
이동거리 불균일	52.3	51.9	1254	1322

5. 결 론

본 논문에서는 자동화 컨테이너 터미널에서 AGV 배차 문제를 수행할 때 많이 사용되는 단일 규칙 기반 배차전략이 다양한 상황에서 안정적인 성능을 보이지 못하며, 배차의 다양한 성능 지표를 고루 만족시키지 못하는 한계를 극복하기 위해 복수 규칙 기반의 배차전략을 제안하였다. 배차전략은 차량 발주 방식 기반으로 여러 배차 규칙의 가중합을 취하여 작업의 선택 기준으로 삼았다. 각 규칙 사이의 최적 가중치를 찾기 위하여 다목적 진화 알고리즘을 사용하였다. 시뮬레이션 실험을 통해 기존의 단일 규칙 기반 배차전략과 비슷한 안벽 크레인 대기시간을 보이면서도 AGV의 주행거리가 단축됨을 확인하였다. 향후에는 탐색을 통해 찾아낸 복합 규칙 기반의 배차전략이 다양한 상황에서 안정적으로 동작할 수 있는지, 안정적으로 동작하지 않을 경우 다양한 상황에 대처하기 위한 방안을 무엇인지에 대한 연구가 필요하다.

후 기

“이 논문 또는 저서는 2011년 교육과학기술부로부터 지원 받아 수행된 연구임” (지역거점연구단육성사업/차세대물류IT 기술연구사업단)

참 고 문 헌

- [1] Bish, E. K.(1999), “Theoretical Analysis and Practical Algorithm for Operational Problems in Container Terminals,” Ph.D. Thesis Northwestern University.
- [2] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T. (2002). “A Fast Elitist Multi-objective Genetic Algorithm: NSGA-II”, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6, pp. 182-197.
- [3] Naso, D., Turchiano, B.(2005), “Multicriteria meta-heuristics for AGV dispatching control based on computational intelligence,” IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics-Part B : Cybernetics, Vol. 35, No. 2, pp. 208-226.

원고접수일 : 2011년 5월 27일

심사완료일 : 2011년 8월 26일

원고채택일 : 2011년 8월 26일