

확률적 시뮬레이션 기반 AGV 배차

최 이* · 박태진** · 류광렬†

*, **부산대학교 대학원, †부산대학교 컴퓨터공학과 교수

AGV Dispatching with Stochastic Simulation

Ri Choe* · Tae-Jin Park** · Kwang-Ryel Ryu†

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

요 약 : 자동화 컨테이너 터미널에서 안벽크레인, AGV (Automated Guided Vehicle)와 같은 하역장비의 작업은 수많은 요인에 영향을 받으며, 이로 인해 각 장비의 작업시간 예측에 있어 불확실성이 존재한다. 이러한 불확실성은 AGV 배차를 어렵게 만들고 작업효율을 떨어뜨리는 주요 원인 중 하나이다. 본 논문에서는 이러한 불확실성에 대처하기 위하여 확률적 시뮬레이션 기반 AGV 배차 알고리즘을 제안한다. 제안 방안은 AGV에 작업을 할당할 때, 할당된 작업의 수행 및 이후 일정 기간 동안의 AGV의 작업에 대해 확률적 시뮬레이션을 여러 번 반복 수행하여 작업할당에 대한 평가치의 확률적 표본을 수집한다. 수집한 표본으로부터 평가의 기대치를 추정하고 이를 이용하여 대안을 평가함으로써 불확실성의 영향을 줄인다. 평가의 신뢰도를 높이기 위해서는 많은 수의 표본을 수집해야 하므로 실시간 제약 하에서 수집 가능한 확률적 표본의 수를 늘리기 위해 이벤트 기반의 고속 시뮬레이션을 디자인하였다. 시뮬레이션 실험을 통해 검증한 결과 불확실성이 있는 환경에서 제안방안의 성능이 정적인 환경을 가정하는 방안보다 뛰어난 것을 확인하였다.

핵심용어 : 확률적 시뮬레이션, 불확실성, AGV 배차, 자동화 컨테이너 터미널

Abstract : In an automated container terminal, various factors affect the operation of container handling equipment such as quay cranes and AGVs, and thus calculating the exact operation time is nearly infeasible. This uncertainty makes it difficult to dispatch AGVs well. In this paper, we propose a simulation-based AGV dispatching algorithm. When dispatching an AGV to an operation, the proposed algorithm conducts multiple stochastic simulation for the succeeding AGV operations for the predetermined period to collect stochastic samples of the result of the dispatching. In the stochastic simulation, the uncertainty of crane operations is represented as a simple probability distribution and the operation time of a crane is determined according to this. A dispatching option is evaluated by the total delay time of quay cranes which is estimated by averaging the quay crane delay of each simulation. In order to collect a sufficient number of samples that guarantee the credibility of the evaluation, we devised a high-speed simulator that simulates AGV operation. The effectiveness of the proposed algorithm is validated by simulation experiments.

Key words : Stochastic simulation, Uncertainty, AGV dispatching, Automated container terminal

1. 서 론

자동화 컨테이너 터미널에는 컨테이너 하역작업을 위해 여러 종류의 장비가 사용된다. 안벽에는 QC(Quay Crane)를 사용하여 정박 중인 컨테이너 선박에서 컨테이너를 싣고 내리며, ASC(Automated Stacking Crane)는 장치장(CY; Container Yard) 내에 임시로 보관되는 수입/수출 컨테이너를 운반한다. 그리고 AGV(Automated Guided Vehicle)는 QC와 장치장 사이의 컨테이너 운반에 사용된다. 특히, 컨테이너 하역작업에 있어 QC는 선박으로부터 직접 컨테이너를 내리고 싣는 장비이므로 터미널의 생산성에 직접 영향을 미치는 가장 중요한 자원이라 할 수 있다. 따라서 컨테이너 터미널의 생산성을 높이기 위해서는 QC를 효율적으로 활용하는 것이 중요하며, 이

와 같은 이유로 QC의 작업 생산성을 향상시키기 위해 더블-사이클링(double-cycling), 탠덤-리프팅(tandem-lifting)과 같은 다양한 운영기법이 연구되고 있다(Goodchild and Daganzo, 2007; Zhang and Kim, 2007). 한편, 컨테이너 하역작업은 QC, AGV, ASC 세 가지 장비의 연계를 통해 이루어지므로 QC의 작업 생산성을 향상시키기 위해서는 QC의 작업효율 향상뿐만 아니라 AGV와 ASC의 지원 또한 중요하다. 특히, AGV는 QC와 직접 컨테이너를 교환하는 장비이기 때문에 AGV의 작업은 QC의 작업에 직접적으로 영향을 준다. 따라서 QC의 작업을 잘 지원할 수 있도록 AGV에 작업을 할당하는 것은 매우 중요하다.

컨테이너 터미널 작업환경에는 불확실성이 존재한다. 예를 들어 QC의 작업시간은 바람, 운전자의 숙련도, 컨테이너의 무

* 대표저자 : 최이(정회원), choilee@pusan.ac.kr 051)510-3531

** 정회원, parktj@pusan.ac.kr 051)510-3531

† 교신저자 : 류광렬(중신회원), krryu@pusan.ac.kr 051)510-2453

게, 컨테이너의 적재위치에 영향을 받아 변한다. ASC의 경우 컨테이너의 장치위치, 다른 ASC와의 간섭, 작업 대상 컨테이너 위에 놓인 다른 컨테이너를 치우는 재취급 작업 등에 영향을 받아 같은 위치에 있는 컨테이너에 대해 작업을 수행할 때에도 작업소요시간이 일정하지 않다. AGV 또한 다른 AGV와의 간섭, 크레인의 작업지연에 영향을 받으며 출발시간 및 당시의 교통상황에 따라 주행시간이 달라진다. 이러한 불확실성은 AGV 배차를 위해 AGV, QC, ASC의 작업 시작, 완료 시간을 예측할 때 오차를 발생시킨다. 특히, AGV, QC, ASC의 작업은 그 전 작업의 영향을 받기 때문에 한번 오차가 발생하면 처음에는 그 크기가 작아도 예측기간이 길어짐에 따라 오차가 누적되어 크기가 점점 증폭된다. 예를 들어, AGV 사이의 간섭은 AGV들이 경로의 교차점을 통과하는 시간차에 의해 발생 여부가 결정된다. 각 AGV가 교차점을 지나는 시간은 직전 교차점에서 AGV가 출발한 시간에 영향을 받으며 출발 시간은 해당 교차점에서 간섭의 발생여부에 의해 결정된다. 마찬가지로 이 또한 그 전 교차점에서의 출발시간에 영향을 받는다. 이와 같은 작업 시간의 오차는 AGV 배차 시 대안 평가의 정확도를 떨어뜨리므로 결과적으로 최적의 대안을 선택할 수 없게 만들어 AGV의 작업효율을 감소시킨다. 따라서 AGV 배차 시에는 이러한 불확실성을 고려할 필요가 있다.

AGV 배차(dispatching) 문제는 AGV 라우팅(routing) 문제와 함께 AGV의 운영과 관련한 주요 문제 중의 하나로서 많은 연구가 앞서 수행되었다. AGV 배차의 목표는 QC의 작업지연을 최소화하고 AGV의 주행비용(연료, 시간 등)을 줄일 수 있도록 각 AGV에 컨테이너 운반 작업을 할당하는 것이다. 기존 연구 중에는 AGV 배차 문제를 혼합정수계획법(mixed integer programming)으로 수식모델을 세우고 그로부터 최적해를 구하려는 시도가 있었다. 그러나 Ganesharajah et al.(1998)에 따르면 이와 같은 모델로부터 최적해를 계산하는 것은 NP-hard 문제이며 문제의 규모가 커짐에 따라 실시간에 최적해를 연산하는 것이 거의 불가능해진다. 이와 같은 이유로 휴리스틱(heuristic)을 이용한 배차 알고리즘이 주로 연구되고 있다. 휴리스틱을 이용한 알고리즘의 한 예로 Kim and Bae (2004)가 제안한 LADP(Look Ahead Dispatching Procedure)가 있다. Kim and Bae는 혼합정수계획법으로 수립한 수식모델로부터 식의 조건을 완화함으로써 휴리스틱을 도출한 후, 도출된 휴리스틱을 이용하여 AGV를 배차하는 방안을 제안하였다. 시물레이션 실험을 통해 LADP를 이용하면 최적해에 근접한 해를 실시간에 연산할 수 있음을 보여주었다. Naso and Turchiano(2005)는 간단한 휴리스틱을 조합하여 AGV를 배차하는 메타 휴리스틱 기법 GMCA(Genetically optimized Multicriteria Algorithm)를 제안하였다. GMCA는 최단시간/거리(STT/D; Shortest Travel Time/Distance)와 같은 간단한 휴리스틱들을 사용하여 AGV에 할당할 후보작업들을 평가한다. GMCA는 퍼지(fuzzy)함수를 이용하여 개별 휴리스틱의 평가를 취합하고, 이를 이용하여 후보작업을 평가한다. 유전자 알고리즘(genetic algorithm)을 이용한 오프라

인(off-line) 탐색을 통해 개별 휴리스틱을 취합하기 위한 가중치를 최적화하였다. 그러나 LADP, GMCA 두 방안 모두 정적인 작업환경을 가정하였으며 AGV 사이의 물리적인 간섭이나 가감속 운동 등은 고려하지 않고 있다.

컨테이너 터미널 작업환경의 불확실성을 고려하는 한 가지 대안으로 AGV의 작업환경에 존재하는 불확실성에 대한 확률 모델을 세우고 이를 대안평가에 활용하는 방안을 생각해볼 수 있다. 예를 들어, 각 대안에 대해 가능한 모든 결과의 확률을 확률모델을 이용하여 계산하고, 이를 가중치로 사용하여 각 결과의 평가를 가중합함으로써 대안의 평가치의 기대치를 계산하는 방안이 있을 수 있다. 그러나 이 방안을 적용하기에는 두 가지 어려움이 있다. 첫 번째 어려움은 AGV의 작업에 영향을 주는 요소가 매우 다양하기 때문에 작업환경의 불확실한 요소를 모두 반영하는 모델을 구축하는 것이 어렵다는 점이다. 또 다른 어려움은 모든 불확실한 요소를 반영하는 모델을 구축하였다더라도 그로부터 정확한 기대치를 계산하는 것은 너무 계산요구량이 너무 크다는 점이다. 간단한 예를 들면, 단지 AGV의 주행시간의 기대치를 계산하는 경우에도 각 교차점에서의 간섭확률을 반영하기 위해서는 대상 AGV가 주행을 시작한 후부터 목적지에 도달할 때까지 다른 AGV와 주행경로가 교차하는 모든 지점에 대해서 가능한 모든 간섭 발생 시나리오를 고려해야 한다. 즉, 주행 경로 상에 n 개의 교차점이 있는 경우, 2^n 가지 간섭발생 시나리오가 있으며 각 시나리오마다 개별적으로 주행시간 계산이 필요하므로 총 2^n 회의 계산이 필요하다.

이와 같은 조건에서 가능한 대안으로 몬테카를로 방법(Monte Carlo method)을 적용할 수 있다. 즉, 확률적 시물레이션을 통해 배차 시 각 대안마다 평가치의 샘플을 수집하고 수집된 샘플들을 평균함으로써 평가의 기대치를 추정하는 것이다. 본 논문에서 제안하는 확률적 시물레이션 기반 AGV 배차 방안은 확률적 표본을 수집하기 위해 AGV의 작업에 대해 확률적 시물레이션을 다수 반복하여 수행한다. 이를 위해 QC와 ASC 작업시간의 불확실성을 간단한 확률모델로 정의하였으며 한정된 시간 동안 가능한 많은 확률적 샘플을 수집할 수 있도록 이벤트 기반의 고속 시물레이션을 디자인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 안벽에서의 AGV의 작업 흐름에 대해 설명한다. 3장과 4장에서는 확률적 시물레이션 기반 AGV 배차 알고리즘과 대안 평가를 위한 확률적 시물레이션을 소개한다. 5장에서는 제안방안을 검증하기 위한 실험 설정을 설명하고 결과를 분석한다. 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

2. 안벽에서의 AGV 작업 흐름

2.1 자동화 컨테이너 터미널

자동화 컨테이너 터미널에서 수출입 컨테이너의 하역작업 공간은 크게 안벽, 에이프런, 장치장의 세 영역으로 나누어진

다. Fig. 1은 본 논문의 대상 터미널의 레이아웃을 나타낸 것이다. 안벽에서는 다수의 안벽크레인을 이용하여 정박 중인 컨테이너 선박으로부터 수입/수출 컨테이너를 내리고 싣는다. 장치장은 안벽으로부터 육지 쪽으로 더 안쪽에 위치한다. 장치장은 여러 개의 블록(block)으로 구성되어 있으며 각 블록마다 ASC가 있다. AGV는 에이프런 영역을 주행하며 QC 아래와 장치장 블록 끝단에 있는 TP(Transfer Point)에서 QC 및 ASC와 컨테이너를 교환한다.

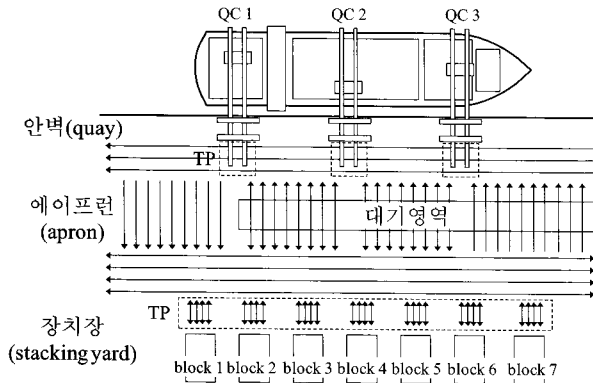


Fig. 1 The layout of an automated container terminal

2.2 AGV의 작업 흐름

AGV의 작업은 양하작업과 적하작업으로 구분된다. 양하작업 시에는 QC로부터 수입 컨테이너를 받아 지정된 블록으로 운반한다. 적하작업 시에는 수출 컨테이너를 보관 중인 장치장 블록에서 ASC로부터 컨테이너를 넘겨받은 후, 지정된 QC로 운반한다. AGV의 작업은 무부하 주행, 상차대기, 부하주행, 하차대기의 네 단계로 이루어진다. 적하작업의 경우 블록의 TP까지 무부하 주행을 한 후, ASC가 컨테이너를 상차하면 컨테이너를 배에 적재할 QC의 TP로 부하주행을 시작한다. QC의 TP에서는 QC가 컨테이너를 하차할 때까지 대기하고 하차가 끝나면 다음 작업을 수행한다. 단, QC로 주행하는 경우 QC의 TP에 정차할 수 있는 AGV의 수가 한정되어 있으므로 TP에 정차 중인 다른 AGV가 있는 경우 운반 중인 컨테이너를 적재할 순서가 될 때까지 Fig. 1의 대기영역에서 대기한다.

본 논문에서는 QC의 작업은 미리 주어진 양/적하 계획에 따라 진행된다고 가정한다. QC는 계획에 따라 순서대로 컨테이너를 싣고 내린다. 따라서 AGV를 배차할 때에는 QC의 작업순서를 고려하여 AGV가 순서대로 TP에 도착할 수 있도록 작업을 할당해야 한다. 특히 적하작업 시 AGV의 도착순서가 QC의 작업순서와 일치하지 않는 경우, AGV는 운반 중인 컨테이너의 차례가 될 때까지 대기영역에서 대기해야 하며 QC의 작업 또한 처리할 컨테이너가 도착할 때까지 지연된다. 반면 양하작업의 경우 AGV는 공차 상태로 QC로 주행하므로 대상 컨테이너를 운반할 AGV가 도착하지 않았더라도 먼저 도착한 다른 AGV가 컨테이너를 대신 운반할 수 있으므로 적

하작업보다 AGV 도착순서의 제약이 강하지 않다.

3. 확률적 시뮬레이션 기반 AGV 배차 알고리즘

본 장에서는 확률적 시뮬레이션 기반 AGV 배차 알고리즘(DSS; Dispatching with Stochastic Simulation)에 대해 설명한다. DSS는 각 AGV가 매번 작업을 완료할 때마다 다음에 수행할 작업을 할당한다. DSS는 l (예견길이; look-ahead length), s (수집할 확률적 표본의 수; sampling size), c (후보작업 수; number of candidates)의 세 가지 인자를 입력받는다. AGV가 작업을 완료한 후 작업할당을 요청하면 아직 AGV가 할당되지 않은 요청작업들 중에서 후보작업을 선택한 후, 각 후보작업을 평가하여 가장 평가가 좋은 작업을 AGV에 할당한다. 후보작업을 평가하기 위해 DSS는 확률적 시뮬레이션을 수행한다. 평가 대상 후보작업이 대상 AGV에 할당된 상태로 시뮬레이션의 초기상태를 설정한 후, 이후 l 개의 작업에 대해 시뮬레이션을 수행하고 QC의 지연시간을 측정한다. 이와 같은 시뮬레이션을 s 회 반복하여 수행하고 측정된 QC 지연시간을 평균하여 QC의 지연시간의 기대치를 추정하고 이를 후보작업 평가에 사용한다. Fig. 2는 DSS의 구체적인 알고리즘이다. DSS의 수행시간은 c , l , s 와 QC의 수 q 에 비례하여 증가한다.

배차 대상 AGV A_i 에 대해 다음을 수행한다.	
Step 1.	q 대의 QC에 대해 각 QC 별로 c 개의 후보작업을 선택하여 후보작업 집합 C 에 추가
Step 2.	C 의 모든 원소 C_k 에 대해
Step 2-1.	C_k 를 A_i 에 할당하고, 이후 l 개의 작업이 완료될 때까지 확률적 시뮬레이션을 수행하고 QC의 총 지연 시간을 측정
Step 2-2.	Step 2-1을 s 회 반복한 후 QC의 총 지연 시간을 평균하여 기대치를 계산
Step 3.	QC의 지연시간의 기대치가 가장 작은 C_k^* 를 A_i 에 할당

Fig. 2 DSS algorithm

DSS는 각 QC의 후보작업 선택 시 마감시간이 빠른 순으로 c 개의 작업을 선택한다. 2.2절에서 가정한 바와 같이 QC는 양/적하 계획에 따라 순서대로 작업하므로 개별 QC에 대해서는 작업 순서가 앞선 작업을 AGV에 우선 할당하는 것이 QC의 지연시간을 줄이는데 유리하다. 그러나 AGV의 위치에 따라 공차주행 시간이 달라지므로 작업순서가 가장 빠른 작업을 AGV에 할당하는 것이 항상 최적의 선택은 아니다. 예를 들어, 적하 컨테이너가 장치되어 있는 블록에 더 가까운 위치에 작업이 끝 완료되는 다른 AGV가 있다면 그 AGV에 작업을 할당하는 것이 더 유리할 수 있다. 또한, QC 작업의 마감시간

에는 불확실성에 의한 오차가 반영되지 않으므로 마감시간 만을 이용하여 각 QC 사이의 우선순위를 결정하는 것은 근시안적일 수 있다. 이와 같은 이유로 DSS는 QC 별로 마감시간이 가장 앞선 작업뿐만 아니라 다음 작업들도 평가를 하여 배차 여부를 결정한다.

DSS는 QC 지연시간을 이용하여 후보작업을 평가하며, 이를 위해 확률적 시뮬레이션을 수행한 후 각 QC 별로 매 작업마다 AGV의 도착지연으로 인해 QC가 대기한 시간을 합계하여 QC 지연시간을 계산한다. 그러나 확률적 시뮬레이션에서 QC와 ASC의 작업시간은 확률분포에 따라 무작위로 결정되므로 실제 작업시간과 오차가 있다. 더구나 작업이 진행될수록 이러한 오차는 누적되기 때문에 시뮬레이션 후반에 측정된 QC 지연시간은 초반에 측정한 지연보다 정확성이 떨어진다고 볼 수 있다. 즉, 시뮬레이션 후반에 측정된 지연일수록 대안 비교에 있어 신뢰도가 낮다. 따라서 QC 지연이 측정된 시점에 따라 가중치를 달리하여 후반에 측정된 지연시간에 보다 작은 가중치를 할당하여 가중 합을 취하면 대안 사이의 비교를 보다 정확하게 할 수 있다. 이 때, QC 지연의 가중 합 D_{QC} 는 식 (1)에 의해 QC의 작업 진행에 따라 가중치를 감소하며 계산할 수 있다. 식 (1)에서 d_i 는 i 번째로 완료된 작업의 지연시간을 의미하며 d_i 에 대한 가중치는 h 를 반감기로 i 에 대해 지수적으로 감소한다.

$$D_{QC} = \sum_{i=1}^l (2^{-(i-1)/h} \times d_i) \quad (1)$$

4. AGV 작업의 확률적 시뮬레이션

DSS에서 후보작업 평가를 위한 시뮬레이션은 고속 시뮬레이션을 위해 이벤트 기반으로 동작한다. 또한, 확률적 시뮬레이션을 위해 QC와 ASC 작업의 불확실성을 모델링하고 시뮬레이션 중 QC와 ASC의 작업시간을 확률적으로 결정한다. 마지막으로 AGV의 가속속 운동 및 AGV 사이의 간섭을 반영하여 AGV의 주행시간을 추정한다.

4.1 이벤트 기반 AGV 작업 시뮬레이션

이벤트 기반 시뮬레이션을 위해 AGV, QC, ASC의 작업 단계에 따라 Table 1과 같이 이벤트를 정의한다. 각 이벤트는 이벤트의 종류, 발생시각, 이벤트를 발생시킨 장비의 ID를 포함한다. 시뮬레이션 중에는 발생시각이 가장 앞선 이벤트부터 순서대로 처리한다. 이벤트 처리 시에는 발생한 이벤트에 맞추어 각 장비의 상태를 변경하고 그에 따른 후속 이벤트를 생성한 후 발생시각을 계산한다.

Table 1에서 E_1 - E_6 은 AGV의 작업과 관련한 이벤트이며 E_7 - E_{10} 은 QC 및 ASC의 작업 이벤트이다. 예를 들어 시간 t 에 E_1 에 의해 적하작업을 할당 받은 AGV는 주행경로 설정을 위해 E_2 를 생성한다. 이후 E_2 를 처리할 때에 AGV에 주행경로

가 할당된다. 주행경로 할당이 성공하면 목적지가 장치장인 경우에는 블록 TP 도착 이벤트 E_5 을 생성하고 QC 인 경우에는 대기위치 도착 이벤트 E_3 을 생성한다. 후속 이벤트의 발생시간은 E_2 의 발생시간에 블록 TP 또는 대기위치까지 주행시간을 더하여 계산한다. 또한, E_2 에 의해 AGV가 목적지를 향해 출발하면 AGV가 정차하고 있던 TP가 비워지므로 이곳으로 주행하기 위해 대기 중인 다른 AGV를 출발시키기 위해 QC TP이면 E_4 를 장치장 TP이면 E_2 를 추가로 발생시킨다. 이벤트 E_4 를 처리할 때에는 대기 중인 AGV가 QC로 주행이 가능한지 확인한 후, 주행 가능하면 QC TP까지 주행시간을 계산하고 E_5 을 생성한다. E_2 와 마찬가지로 대기위치로 주행하기 위해 대기 중인 모든 AGV에 대해 다시 한 번 주행경로를 설정하기 위해 E_2 를 추가한다. Table 1에서 이벤트 E_1, E_2, E_4 는 AGV를 제어하기 위한 이벤트이다. 본 논문에서는 이와 같은 이벤트의 처리가 실시간에 이루어진다고 가정한다. 따라서 이러한 이벤트의 발생시각은 해당 이벤트를 생성한 이벤트의 발생시각에 시뮬레이션의 단위시간 t_u 를 합하여 계산한다.

QC의 적하작업과 ASC의 양하작업은 E_6, E_8, E_7, E_9 의 순서로 수행된다. 만약 E_6 이 발생하였을 때, 컨테이너를 운반하는 AGV가 TP에 도착하지 않았다면 QC는 대기상태가 되며 후속 이벤트는 발생시키지 않는다. 이후 AGV가 QC에 도착하여 E_5 가 발생하면 후속 이벤트 E_8 를 생성하며 E_6 의 발생시간 t_6 부터 대상 AGV의 도착 이벤트 E_5 의 발생시간 t_5 사이의 차가 QC의 지연시간이 된다. 반대로 QC의 양하작업 및 ASC의 적하작업은 E_6, E_9, E_7, E_8 순서로 수행되며 E_7 의 발생 시점까지 AGV가 도착하지 않으면 QC작업에 지연이 발생한다.

Table 1 The list of events

이벤트	이벤트 설명	가능한 후속 이벤트
E_1	AGV에 새로운 작업 할당	E_2
E_2	AGV 경로설정	E_2, E_3, E_4, E_5
E_3	대기영역 도착	E_4
E_4	QC로 주행 가능한지 여부 검사	E_2, E_5
E_5	QC 또는 블록 TP에 도착	E_8
E_6	QC/ASC 무부하 주행완료	E_8, E_9
E_7	QC/ASC 부하 주행완료	E_8, E_9
E_8	컨테이너 상/하차 완료	E_1, E_2, E_6, E_7
E_9	선박/블록 컨테이너 적재완료	E_6, E_7

시뮬레이션 중 AGV 배차는 간단한 휴리스틱 (LWF; Longest waiting QC first)을 사용한다. 먼저, 처리 중인 작업에 AGV가 할당되지 않아 대기 중인 QC가 있는 경우 대기시간이 가장 긴 QC의 작업을 AGV에 우선 할당한다. AGV 할당을 대기 중인 QC가 없거나 동물이 발생한 경우에는 AGV가 가장 적게 할당된 QC의 작업을 할당한다. AGV가 가장 적

게 할당된 QC가 두 대 이상인 경우에는 그 중에서 무작위로 선택한다. AGV 경로설정 및 주행시간 계산 시에는 최 등 (2006)에서 제안한 주행시간 추정알고리즘을 이용하여 가능한 모든 주행경로의 주행시간을 추정하고 주행 시간이 가장 짧은 경로를 AGV에 할당한다.

4.2 크레인 작업 시간 모델링

QC 및 ASC의 작업은 무부하주행(ET; Empty Travel), 컨테이너 실기(PU; Pick Up), 부하주행(LT; Loaded Travel), 컨테이너 내리기(DO; Drop Off)의 네 단계를 따라 진행된다. QC가 작업하는 중에는 풍속, 컨테이너 적재위치와 같은 요인에 의해 지연이 발생할 수 있으며 이와 같은 지연에 의해 QC 작업 시간에 불확실성이 생긴다. ASC의 경우, 작업대상 컨테이너 위에 다른 컨테이너가 있으면 이를 치우기 위한 채취급 작업을 수행하는데 이와 같은 채취급 작업 시간이 작업지연에서 큰 비중을 차지한다. 본 논문에서는 이와 같은 지연시간에 대해 식 (2)와 같은 정규분포를 따르는 단순한 모델을 가정한다.

$$N(\mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

QC의 작업 시간(T_{qc})은 식 (3)과 같이 무부하주행시간(E_{qc}), 컨테이너 적재시간(P_{qc}), 부하주행시간(L_{qc}), 컨테이너를 내리는 시간(D_{qc}) 및 작업 중 지연시간(e_{qc})의 합으로 계산하며 e_{qc} 는 정규분포 $N(\mu_{qc}, \sigma_{qc}^2)$ 을 따른다.

$$T_{qc} = E_{qc} + P_{qc} + L_{qc} + D_{qc} + e_{qc} \quad (3)$$

ASC의 작업시간은 식 (4)과 같이 무부하주행시간(E_{asc}), 컨테이너 적재시간(P_{asc}), 부하주행시간(L_{asc}), 컨테이너를 내리는 시간(D_{asc})과 정규분포 $N(\mu_{asc}, \sigma_{asc}^2)$ 을 따르는 지연시간(e_{asc})의 합으로 계산한다. ASC의 주행시간은 ASC의 주행거리(d)와 ASC의 최대속도 V_{max} 및 가속도 a 를 이용하여 추정한다. ASC의 가속운동 구간의 길이(s)는 식 (5)를 이용하여 계산한다. $d < s$ 이면 식 (6)에 따라 계산하고, $d \geq s$ 이면 식 (7)과 같이 계산한다.

$$T_{asc} = E_{asc} + P_{asc} + L_{asc} + D_{asc} + e_{asc} \quad (4)$$

$$s = \frac{V_{max}^2}{a} \quad (5)$$

$$E_{asc} = L_{asc} = \frac{2V_{max}}{a} + \frac{d-s}{V_{max}} \quad (\text{if } d < s) \quad (6)$$

$$E_{asc} = L_{asc} = 2\sqrt{\frac{d}{a}} \quad (\text{if } d \geq s) \quad (7)$$

5. 실험 및 결과 분석

5.1 실험 설정

제안방안의 성능은 시뮬레이션 실험을 이용해 검증하였다. 실험에 사용한 시뮬레이터는 AGV 사이의 물리적 간섭을 고려하여 AGV의 좌표, 방향, 속도, 가속도를 0.1초 단위로 갱신할 수 있다. 시뮬레이션 시 QC와 ASC의 작업시간은 4.2절에서 설명한 크레인 작업 시간 모델에 의해 결정된다. 즉, DSS의 확률적 시뮬레이션의 크레인 작업의 불확실성 모델은 작업 환경의 불확실성을 완벽히 반영할 수 있다고 가정하였다. 대상 터미널은 선석이 하나 있고 선석 내부에는 QC 3대, 장치장 블록이 7개 있는 터미널로 설정하였다. 각 장치장 블록은 41개의 베이(bay)로 구성된다. 시뮬레이션 시나리오는 9대의 AGV를 이용하여 적하 작업을 수행 중인 것으로 가정하였다. 적하 컨테이너의 장치위치는 블록을 삼등분했을 때 해측 3분의 1영역 안에서 무작위로 결정하였다. 또한, QC 별 작업부하 및 ASC 별 작업 부하가 고르게 분포하도록 작업 물량을 생성하였다. 컨테이너가 100개 적하될 때 까지 QC의 컨테이너 당 평균 지연시간을 측정하였다.

실험에 사용한 AGV, QC, ASC의 사양은 Table 2, 3, 4와 같이 설정하였다. 각 QC는 평균적으로 시간 당 컨테이너를 약 40개 처리할 수 있으며, 각 ASC는 평균적으로 시간 당 약 18개의 컨테이너를 처리 가능하도록 설정하였다.

Table 2 AGV specification

직진속도	회전속도	가속도(가속)	가속도(감속)
4m/s	2m/s	0.64m/s ²	1.55m/s ²

Table 3 QC specification

E_{qc}	P_{qc}	L_{qc}	D_{qc}	μ_{qc}	σ_{qc}
16s	20s	16s	20s	16s	6

Table 4 ASC specification

V_{max}	a	P_{asc}	D_{asc}	μ_{asc}	σ_{asc}
3.0m/s	0.375m/s ²	44s	44s	64.5s	21.3

비교방안으로는 세가지 휴리스틱방안 무작위할당(Random), 대기시간 우선할당 방안(LWF), 마감시간 우선방안(EDF; Earliest Deadline First)을 실험하여 기준으로 삼았다. 무작위 할당 방안은 후보작업 중 하나를 무작위로 선택하며 EDF는 마감시간이 앞선 작업을 우선 할당한다. LWF는 4장에서 설명한, 평가 시뮬레이션 중에 AGV에 작업을 할당할 때 사용하는 휴리스틱 배차방안이다. 또한, 정적 시뮬레이션 기반 AGV 배차(DDS; Dispatching with Deterministic Simulation)의 성능을 제안방안(DSS)과 비교하여 확률적 시뮬레이션의 효과를

검증하고자 한다. DDS는 정적인 환경을 가정하고 평가 시뮬레이션을 수행한 후 QC 지연이 가장 짧은 작업을 AGV에 할당한다. 정적 시뮬레이션 중 QC의 지연시간 e_{qc} 와 ASC의 작업 지연시간 e_{asc} 는 각각 Table 3과 4의 평균치 μ_{qc} 와 μ_{asc} 를 사용한다. 제안방안(DDS)의 경우 예견길이 l 과 표본크기 s 를 변경해가며 실험하였으며 QC 당 후보작업 수 c 는 1을 사용하였다. 또한, DDS와 DSS 방안과 함께 확률적 시뮬레이션 또는 정적 시뮬레이션에서 QC의 지연시간 측정 시 지수적으로 감소하는 가중치를 적용하는 방안(각각 DSS_W, DDS_W라 칭함)을 실험하여 결과를 비교하였다. 각 비교방안은 40회씩 실험하였으며 QC 지연시간의 평균을 비교하였다.

5.2 실험 결과

Table 5는 휴리스틱 방안 Random, LWF, EDF의 QC 지연시간을 측정된 결과이다. EDF가 가장 좋은 성능을 보였다. 그 이유는 실험용 작업 물량 생성 시, 각 QC와 ASC의 작업부하가 균등하게 유지되도록 컨테이너를 분배하고 마감시간을 결정함으로써 작업 마감시간에 따라 AGV를 할당하는 EDF에 매우 유리하도록 실험을 설정하였기 때문이다. LWF는 QC에 할당된 AGV의 수를 균등하게 유지하므로 QC의 지연 가능성을 줄일 수 있어 Random에 비해 나은 성능을 보였지만 EDF 보다는 성능이 좋지 않았다. EDF_D는 불확실성이 없는 환경에서의 EDF의 성능이다. EDF와 EDF_D의 결과를 비교함으로써 작업환경의 불확실성이 배차성능에 미치는 영향을 확인할 수 있다.

Table 5 Comparison of QC delay time among heuristic methods

	QC delay(sec/box)
Random	51.2
LWF	37.3
EDF	29.1
EDF_D	26.4

Table 6은 정적인 시뮬레이션을 사용하는 비교방안 DDS를 다양한 예견길이 l 값에 대해 실험한 결과를 보여준다. l 값은 배차 시 이미 AGV가 할당되어 진행 중인 작업을 포함하여 이후 몇 개의 작업을 완료할 때까지 평가 시뮬레이션을 수행할 지 결정한다. 따라서 l 이 작은 경우 가까운 미래의 결과만 고려하므로 근시안적으로 대상 작업을 평가하게 된다. 특히 l 이 AGV의 수보다 작은 경우 평가 대상 작업이 완료되기 전에 평가 시뮬레이션이 끝날 가능성이 높아 대상 작업에 AGV를 할당한 것이 이후 AGV 작업 상황에 미치는 영향을 잘 반영할 수 없다. 반대로 l 이 너무 큰 경우 평가 시뮬레이션 중

오차가 누적되어 평가결과의 정확성이 떨어진다. Table 6의 결과는 이와 같은 예측과 일치한다.

Table 6 The performance of DDS (sec/box)

l	10	15	20	25	30
DDS	35.4	30.8	30.6	31.5	32.3

Fig. 3은 제안방안 DSS의 성능을 표본크기 s 에 따라 도표로 나타낸 것이다. DSS의 l 값은 Table 6에서 가장 좋은 결과를 보였던 15와 20으로 설정하였다. 표본크기가 증가할수록 성능이 개선되었으며 표본크기가 10이상 이 되면 성능 향상이 점점 둔화되었다. 표본크기 10 이상부터 DDS 보다 나은 성능을 보이는데, 표본크기가 30인 경우 가장 좋은 성능을 보였으며 l 이 15일 때 28.6초, 20일 때 29.3초였다. 표본크기 30의 결과를 t-검정을 통해 DDS와 비교한 결과 유의수준 5%에서 DDS보다 QC 지연이 짧은 것을 확인하였다.

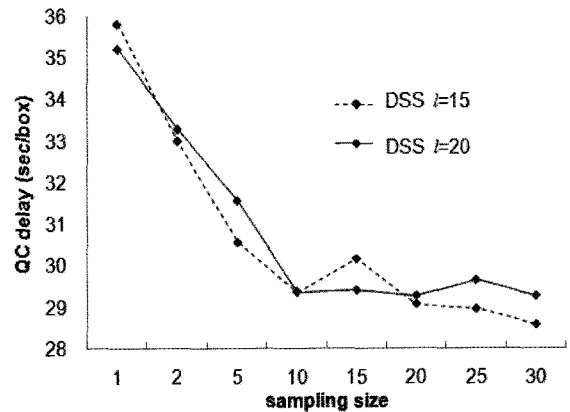


Fig. 3 The performance of DSS with various sampling size s

Table 7, 8은 각각 DDS_W와 DSS_W의 결과를 보여준다. 두 방안 모두 가중치의 반감기 h 는 평균적으로 우수한 성능을 보인 10으로 설정하였다. DDS_W의 성능이 table 5의 EDF보다 개선되었으며, DSS_W의 경우 s 가 충분히 커지면 EDF, DDS_W 두 방안의 성능을 추월하였다. 심지어 가장 좋은 성능을 보인 조합($l=20, s=20$)에서는 EDF_D에 근접한 성능을 보였다. DSS의 결과와 마찬가지로 유의수준 5%로 t-검정을 수행한 결과 DDS_W의 최소값 28.0보다 ($l=20, s=20$)에서 QC 지연이 더 작은 것을 확인하였다.

Table 7 The performance of DDS_W (sec/box)

l	15	20
DDS_W	28.0	28.1

Table 8 The performance of DSS_W (sec/box)

$l \backslash s$	1	2	5	10	15	20	25	30
15	33.1	32.2	30.0	28.4	28.1	27.5	28.4	27.6
20	32.8	31.3	28.7	28.1	27.0	26.6	26.8	26.9

Table 9는 AGV 수 6, 9, 12로 변경하였을 때, 각 배차 방안의 성능변화를 보여준다. AGV를 6대 사용하였을 때 DDS_W와 DSS_W의 성능차이가 더 커진 반면, 12대를 사용한 경우에는 비교방안과의 차이가 감소하였다. 유의수준 5%로 t-검정을 수행한 결과 AGV가 12대인 경우 EDF, DDS_W, DSS_W 사이에는 유의한 성능 차이가 나타나지 않았다. 이는 AGV 수가 많을 때에는 유휴 AGV가 많아지므로 배차를 잘못했다라도 다른 AGV를 배차함으로써 손실을 줄일 수 있지만 AGV 수가 적은 경우에는 유휴 AGV가 거의 없기 때문에 배차를 잘못하여 발생한 지연이 치명적이기 때문이다.

Table 9 Comparison of the performance of dispatching methods with different number of AGVs (sec/box)

No. AGV	6	9	12
Random	90.3	51.2	31.2
LWT	79.7	37.3	15.7
EDF	71.4	29.1	12.9
DDS_W ($l=20$)	69.8	28.1	12.7
DSS_W ($l=20, s=20$)	67.8	26.8	13.2

이 모든 시뮬레이션 실험은 3.2GHz 펜티엄 4 컴퓨터를 이용하여 수행하였다. 실험 설정 중 가장 시간이 많이 걸린 DSS_W ($l=20, s=30$)의 경우 AGV 한 대에 작업을 하나 할당하는데 약 20초가 소요되었다. 실제 컨테이너 터미널에서 QC나 ASC가 컨테이너를 하나 처리하는데 1분 이상 걸리는 점을 감안할 때, 실시간 적용이 충분히 가능한 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 논문에서는 불확실성이 있는 작업환경에서 AGV를 효율적으로 배차하기 위해 확률적 시뮬레이션에 기반한 AGV 배차알고리즘을 제안하였다. 제안방안은 QC와 ASC의 작업시간의 불확실성을 정규분포를 따르는 단순한 모델로 가정하고 이를 바탕으로 확률적 시뮬레이션을 수행하여 AGV 작업 할당 결과를 평가하였다. 이를 통해 AGV에 할당 가능한 후보 작업을 평가할 때 불확실성이 평가에 미치는 영향을 줄이고자 하였다. 시뮬레이션 실험을 통해 제안방안을 검증한 결과 크레인 작업에 불확실성이 존재하는 작업환경에서는 불확실성을

고려하여 AGV를 배차하는 것이 QC 지연시간을 줄이는데 효과적임을 확인할 수 있었다.

본 논문에서는 QC와 ASC 작업의 불확실성을 정규분포를 따르는 단순한 모델로 가정하였으나 성능개선을 위해서는 보다 정교한 불확실성 모델이 필요하다. 특히 ASC의 경우 재취급작업과 다른 ASC와의 간섭에 의한 지연이 작업시간에 큰 영향을 미치므로 이를 반영하는 모델 수립이 필요하다. 또한, 제안 방안의 확률적 시뮬레이션은 작업환경의 불확실성을 정확하게 반영한다는 가정에 따라 작업환경과 동일한 모델을 사용하였다. 그러나 실제 터미널에서 AGV 작업에 영향을 주는 요인은 매우 다양하기 때문에 실제 환경의 불확실성을 완전히 반영하는 모델을 구축하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 불확실성모델이 환경의 불확실성을 완전히 반영하지 못하는 상황에서 제안 방안의 성능을 확인할 필요가 있다. 이를 위해 본 논문의 불확실성 모델보다 정교한 불확실성 모델을 정의해야 할 뿐만 아니라 더 나아가 제안 방안은 단순히 수집한 평가 결과의 평균을 이용하였지만 제한된 불확실성 모델로부터 수집한 확률적 표본을 이용하여 대안들을 보다 정확히 비교하는 방안에 대한 연구가 필요하다.

후 기

이 논문은 2008년 교육과학기술부로부터 지원받아 수행된 연구임 (지역거점연구단육성사업/차세대물류IT기술연구사업단)

참 고 문 헌

- [1] 최이, 박태진, 류광렬 (2006), "가감속을 고려한 교착없는 AGV 주행경로 설정", 한국항해항만학회지, 30권 10호, pp. 855-860.
- [2] Ganesharajah, T., Hall, N. G., and Sriskandarajah, C. (1998), "Design and operational issues in AGV-served manufacturing systems", Operational Research, Vol. 76, pp. 109-154.
- [3] Goodchild, A. V. and Daganzo, C. F. (2007), "Crane double cycling in container ports: Planning methods and evaluation", Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 41, pp. 875-891.
- [4] Kim, K. H. and Bae, J. W. (2004), "A look-ahead dispatching method for automated guided vehicles in automated port container terminals", Transportation science, Vol. 38, No. 2, pp. 224-234.
- [5] Naso, D. and 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.
- [6] Zhang, H. and Kim, K. H. (2007), "Dual cycling quay

crane optimization with constraints of twin lift",
International conference on intelligent manufacturing
and logistics systems(IML2007) in CD.

원고접수일 : 2008년 9월 3일
심사완료일 : 2008년 11월 29일
원고채택일 : 2008년 12월 3일