

컨테이너 터미널 동적 운송 환경에서의 실시간 차량 운행 계획*

구평희** · 이운식** · 고시근**

A Vehicle Dispatching for Dynamic Freight Transportation in Container Terminals*

Pyung-Hoi Koo** · Woon-Seek Lee** · Shie-Gheun Koh**

■ Abstract ■

This paper deals with a container terminal where containers are discharged by quay cranes from a ship and transported by a fleet of vehicles to the terminal yard. Since container terminals are fully utilized in general, it is important to increase terminal throughput by discharging the containers out of the ship without any delay. At the operational level, it should be decided which vehicle transports which container. The vehicle dispatching decision should be carefully made since the container discharging time increases when the quay cranes wait idle for the vehicles. This paper presents vehicle dispatching heuristics with the objective of minimizing the total container discharging time. The heuristics are based on a network flow model and a look-ahead concept. Through some experiments, the performance of the dispatching methods is evaluated.

Keyword : Seaport Container Terminal, Vehicle Dispatching, Container Transportation

1. 서 론

무역자유화와 기업 활동의 글로벌화에 따라 국가간의 무역이 증대됨으로써 항만기능의 중요성이

더욱 증대되고 있다. 세계 컨테이너 물동량은 지속적으로 증가하여 1990년 약 1억 TEU (1TEU는 20 feet 컨테이너 1개)에서 2000년에는 2억 TEU를 상회했고, 2010년에는 4억 TEU를 넘어설 것

논문접수일 : 2004년 7월 12일 논문게재확정일 : 2005년 5월 30일

* 이 논문은 2002년도 학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2002-002-D00200).

** 부경대학교 시스템경영공학과

로 전망하고 있다[2]. 따라서 각국은 항만 컨테이너 터미널을 중심으로 물류허브를 구축하고 물류 선진화를 달성하기 위하여 노력하고 있다. 최근에는 중국을 중심으로 한 경제권의 성장으로 이 지역에서의 물류 경쟁력을 확보하기 위하여 컨테이너 터미널의 증설과 시스템 인프라 및 자동화에 대한 투자가 증대되고 있다. 부산은 장기적으로는 2011년까지 7조5천억원을 투자하여 신항만을 건설하여 전세계 물동량의 27%를 차지하는 동북아의 물류 중심 기지를 목표로 하고 있다. 2002년 기준 부산항은 그 규모가 세계 3대 컨테이너 처리 항으로 성장하였으나, 2003년 이후 중국의 항만에 대한 적극적인 투자와 효율화로 상하이항과 선전항이 부산항의 위치를 추월하고 있다.

물류 허브가 되기 위해서는 하드웨어적인 항만 인프라 구축뿐만 아니라 운영의 선진화도 함께 이루어져야 한다. 그러나 지금까지는 운영의 합리화를 위한 소프트웨어적인 접근은 미비한 상태이다. 특히 컨테이너 운반에 대한 운영 기술은 최근의 정보통신 기술의 발달에 따른 환경 변화로 인해 그 접근법에서 변화가 있어야 한다. 즉 GPS, GIS, PDA, 이동통신 등 최근의 정보통신 기술의 발달로 인하여 실시간으로 정보를 취득 가공하는 것이 가능해졌고, 따라서 동적인 물류상황에서의 효율적인 의사결정이 가능해 졌다.

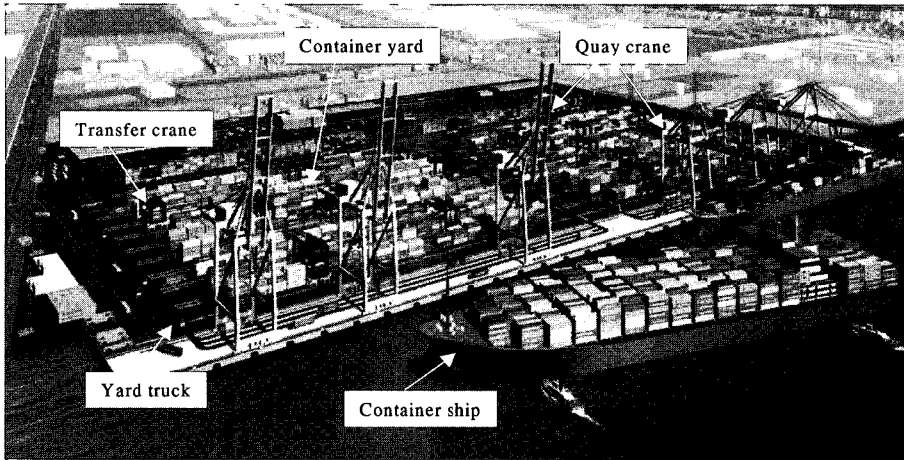
현재, 컨테이너 물동량의 증가로 대부분 컨테이너 터미널은 최대능력으로 운영되고 있다. 이러한 환경에서는 얼마나 빠르게 컨테이너를 선박에서 내리고(양하) 또는 실는가(적하) 하는 것이 중요한 경쟁력의 요소이다. 일반적으로, Quay Crane(QC)은 컨테이너터미널에서 병목자원이므로 QC를 최대한 활용하는 것이 곧 양하 및 적하 시간을 줄이는 길이다. 부산항에서 한대의 QC가 연간 처리하는 컨테이너 처리량을 컨테이너를 가장 많이 처리하는 홍콩항과 비교해 보면, 부산항은 평균 11만 6천 TEU인데 반하여 홍콩항은 16만 3천 TEU로 나타나, 부산항이 홍콩항에 비하여 71% 수준의 생산성을 보이고 있다[3]. 따라서, 부산항이 항만경쟁력을

높이기 위해서는 QC의 생산성을 증대시키는 노력이 필요하다.

본 논문에서는 화물운반 요구가 동적으로 발생하는 컨테이너터미널에서의 컨테이너 운반차량 배차문제를 다룬다. 여기서, 차량의 배차는 QC가 차량을 기다리기 위한 대기 시간을 최소화하여 컨테이너선의 양하시간을 최소로 하는 것이 목적이다. 차량의 배차는 차량주도형과 작업주도형으로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 이들 두 형태의 수행도에 대해서도 비교분석 연구를 수행한다. 본 논문에서는 정보통신 기술의 발달로 정보를 실시간으로 얻을 수 있는 상황에서 가까운 미래 상황 정보를 의사결정에 활용한 look-ahead 의사결정과 network flow 개념을 이용한 최적화 모델을 기반으로 하는 차량 배차 방법을 제시한다. 마지막으로 실험을 통하여 차량 배차 방법에 대한 수행도를 분석한다.

2. 컨테이너 터미널 운영 및 기존 연구

[그림 1]은 전형적인 컨테이너 터미널의 배치를 보여주고 있다. 컨테이너 터미널은 수출 컨테이너를 야드장에서 컨테이너선에 선적하는 적하작업과 수입 컨테이너를 컨테이너선에서 야드장으로 옮기는 양하 작업으로 나눌 수 있다. 적하작업은 양하 작업의 역순이므로 여기서는 양하작업시의 컨테이너 터미널 운영에 대해서만 설명한다. 컨테이너선이 안벽에 접안하면 수입 컨테이너는 QC에 의해서 선박으로부터 컨테이너 야드트럭으로 옮겨진다. 컨테이너를 적재한 야드트럭은 해당 컨테이너의 목적지인 컨테이너 야드장으로 이동한다. 컨테이너 야드장은 여러 야드블록으로 나누어져 있고 각 야드블록은 TC(transfer crane)에 의해 물류 작업이 수행된다. 컨테이너를 실은 차량이 목적지인 야드블록에 도착하면 TC는 야드트럭에서 컨테이너를 들어올려 야드블록 내의 해당 위치에 옮겨 놓는다. 일정한 시간이 지나면 저장된 컨테이너는 TC에 의



[그림 1] 전형적인 컨테이너 터미널의 배치

해 야드블록에서 인출되어 철도야드장, ODCY, CFC, ICD, 연안부두 등 다른 장소로 이동된다. 야드블록에서 컨테이너를 하차한 야드트럭은 다음 컨테이너를 운반하기 위하여 QC 장소로 돌아간다. 본 논문에서의 차량배치는 양하작업만을 대상으로 한다. 적하작업에서는 본 논문 결과를 약간의 수정을 거쳐서 사용될 수 있을 것이다.

본 논문에서 다루는 동적인 환경에서 단위화물의 차량배차문제에 대한 연구는 지금까지 대부분 생산시스템에서의 제품운반 환경에서 수행되었다. Egbelu and Tanchoco[11]는 유휴 차량에서 가장 가까이에 있는 제품을 선택하여 운반하는 shortest-travel-time 정책을 제시하였고, Bartholdi and Platzman[9]은 폐쇄 단일 루프 형태의 물류시스템에서 운반 차량이 계속 루프를 순회하면서 가장 먼저 마주치는 제품을 운반하는 first-encountered-first-served 정책을 제시하였다. 구평희 등[1]은 반도체 공장에서 운반장비의 배차를 하는 경우 병목공정을 중심으로 의사결정을 하면 생산성이 증가됨을 보였다. 생산시스템에서는 제품을 보관하는 버퍼 공간의 제한적인 경우가 있으므로 이를 고려한 배차 결정 방법도 많이 연구되었다[11, 13, 15, 18, 19]. 차량 배차 결정을 위하여 경매의 원리를 이용한 연구도 수행되었다. Bozer and Yen[10]은

운반 요구가 있을 때 모든 운반차량에 대하여 응답 시간(response time : 운반을 요청하고 나서 차량이 운반을 시작할 때까지의 시간)을 기초로 bid(경매 응찰가격)를 계산하고 이중 최저가격으로 응찰한 차량에 작업을 할당하는 경매기반의 동적 배차정책을 제시하였다. Hwang and Kim[14]은 운행거리, input 버퍼, output 버퍼 등을 고려하여 bid 값을 작성하여 배차하는 방법을 제시하였다. Lim *et al.*[17]은 차량의 총 운행시간과 응답시간을 최소화하기 위하여 시스템 미래상태를 고려하여 다수의 운반 요구와 다수의 차량을 동시에 할당하는 경매기반의 배차정책을 제시하였다.

위에서 언급한 생산시스템에서의 차량 배차 방법은 컨테이너 터미널의 독특한 특징 때문에 터미널 내에서의 컨테이너 운반작업을 위한 효율적인 방법이 되기 어렵다 : 예를 들어, 일반적으로 컨테이너 양하작업에서는 컨테이너선이 접안되기 전에, 작업할 QC가 선정되고 각 QC는 어떤 컨테이너를 어떤 순서로 운반해야 하는지를 나타내는 QC job sequence가 있어 QC는 이 순서에 의해서 컨테이너를 처리한다. 따라서 컨테이너를 QC에서 받아 야드장으로 운반하는 야드트럭은 다음에 준비될 작업을 미리 알 수 있다. 또한, QC는 일반적으로 output buffer가 없으므로, 컨테이너가 운반 준비

완료된 후 차량에 이적될 때까지의 시간 동안 QC는 유휴상태로 되고 이는 총 양하작업시간의 지연으로 이어진다. 또 다른 특징은, 생산시스템에서는 일반적으로 한 위치에서 pickup과 delivery 작업이 둘 다 발생하는데 반하여 컨테이너 터미널의 양하 작업에서는 pickup 위치(QC)와 delivery 위치(야드장)가 분리되어 있다. 이러한 독특한 특징 때문에, 최근에 컨테이너 터미널 물류에 대한 관심이 증대되고 있다. Bish[7]는 하나의 컨테이너선에 하나의 QC가 운영되는 경우 차량의 배차 문제를 분석적으로 설명하고, greedy 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 n 대의 차량이 운행된다고 할 때, QC가 양하할 처음 n 컨테이너를 각 차량에 할당하여 운반하게 하고, 그 다음 컨테이너부터는 운반을 완료한 후 가장 먼저 돌아온 차량에 다음 컨테이너를 배정하는 방식이다. 이 greedy 알고리즘은 한대의 QC가 운영되는 환경에서는 컨테이너 선박의 접안시간을 최소화하는 최적차량 배차 방법이라는 것이 증명되었다. Bish *et al.*[8]은 차량의 배차와 컨테이너의 위치 결정문제를 동시에 해결하는 절차를 연구하였다. Bish는 이러한 차량배차 및 컨테이너 위치 결정 문제가 NP-hard 문제임을 증명하고 이 문제를 해결하기 위하여 2단계 휴리스틱 방법을 제시하였다. 첫 번째 단계에서는 할당(Assignment)문제를 해결하고 이를 기초로 컨테이너에 위치를 할당하고, 두 번째 단계에서는 greedy 알고리즘을 이용하여 각 컨테이너를 차량에 배차한다. Kim and Bae[16]는 무인운반차인 AGV를 이용하여 컨테이너를 운반하는 경우에 컨테이너를 선박에서 양하하는 총시간과 차량의 이동거리 최소화를 목적으로 하는 차량 배차문제를 혼합정수계획으로 모델링하고 이를 기반으로 한 휴리스틱 방법을 제시하였다. 각 차량은 하나의 QC에 고정적으로 배정되는 상황을 가정하였다. Bae and Kim[6]은 그들의 이전 연구를 확장하여 차량이 여러 QC에서 공동으로 사용되는 경우를 포함하였다. Grunow *et al.*[12]은 두 개 이상의 컨테이너를 운반할 수 있는 차량으로 운영되는 컨테이너 터미널에서의 차량배차

(MLVD : multi-load vehicle dispatching)에 대한 연구를 수행하였다. 시뮬레이션을 통하여 MLVD 방식이 일반적인 차량을 이용하는 것보다 차량의 대기시간을 줄일 수 있음을 보여주고 있다. Vis and Koster[20]는 컨테이너 터미널에서의 설계 및 운영시의 여러 의사결정 문제를 정의하고 지금까지의 연구를 종합적으로 정리한 조사는문을 발표하였다.

본 논문은 컨테이너 양하시간을 최소화하기 위하여 network flow 최적화 모형을 기반으로 한 배차 방법을 제시한다. 이 방법에서는 컨테이너 터미널에서 QC job sequence와 현재의 물류 상태를 이용하여 다음에 운반할 컨테이너와 야드트럭으로 network로 구성하고, 이를 기반으로 QC의 대기시간이 최소가 되도록 차량배차를 결정하는 것이다. 본 논문에서는 또한 컨테이너 터미널의 배차방법에서 작업주도형과 차량주도형 배차의 수행도를 비교 평가 한다. 특히 작업주도형 배차에서 가까운 미래 상황 정보를 의사결정에 활용한 look-ahead 개념을 이용한 배차방법을 제시하고 그 타당성을 실험한다.

3. 컨테이너운반 차량배차문제의 정의 및 모형정립

일반적으로 실시간으로 차량을 배차하기 위한 결정은 운반 event의 발생에 의해서 시작된다. 운반해야할 컨테이너가 하나 있고, 이때 유휴 중인 차량이 여러 대 있다면 어떤 차량이 해당 컨테이너를 운반해야 하는가를 결정해야 한다. 컨테이너 운반 요구가 있을 때 유휴 중인 차량이 없다면 차량이 운반 작업을 완료한 후 배차된다. 이때는, 운반을 위해 차량을 기다리는 컨테이너가 두 개 이상이면 그 중에서 하나의 컨테이너를 선택하는 결정을 해야 한다. 전자를 작업주도형배차(WID : Work Initiated Dispatching)라 하고 후자를 차량주도형배차(VID : Vehicle Initiated Dispatching)라고 부른다. 일반적으로 운반요구를 예측할 수 없는 경우는 이 두

가지 배차정책을 동시에 사용한다. 그러나 컨테이너 터미널에서는 운반요구 시점을 예측할 수 있으므로 차량 풀제를 활용하는 경우 운영의 용이성 때문에 차량이 작업을 마친 후 그 시점에서의 운반요구를 고려하여 다음 수행할 작업을 결정하는 차량 주도형배차가 주로 사용되는 실정이다. 본 논문에서 대상으로 하는 컨테이너 터미널의 양하작업 환경은 아래와 같다.

- (1) 한 컨테이너선은 여러 대의 QC에 의해 양하작업이 수행된다.
- (2) 컨테이너 운반을 위한 차량 배차의 목적은 QC의 대기시간을 최소로 하여 총 양하시간을 최소로 하는 것이다.
- (3) 각 QC가 양하작업할 컨테이너의 순서는 미리 결정되어 있고, 각 컨테이너의 목적지는 정해져 있다.
- (4) QC가 컨테이너를 컨테이너선으로부터 차량으로 운반 이동하는 시간은 각 컨테이너 별로 다르고 소요시간은 알려져 있다.
- (5) 두 지점 간의 차량 운행시간 및 차량에 컨테이너를 싣고 차량에서 내리는 시간은 알려져 있다.
- (6) 차량 1대는 하나의 컨테이너를 운반한다(컨테이너는 20피트와 40피트 두 종류가 존재하지만 양하 작업에서는 일반적으로 컨테이너의 크기와 관계없이 한 차량 운행에 하나의 컨테이너만 운반된다).

본 논문에서의 차량배차의 목적은 QC를 최대한 활용하여 컨테이너선의 양하작업시간을 최소화하는 것이다. 차량이 하나의 QC를 위해 전용으로 사용되는 경우의 최적 모형은 앞서 언급한 Bish[7]에 의해 얻을 수 있으므로, 본 절의 수리 모형은 차량이 모든 QC에서 공동으로 사용되는 경우를 위한 것으로, Bae and Kim[6]이 제시한 모형을 양하시간 최소화를 위해 수정된 것이다. 본 절에서 사용하는 기호는 아래와 같다.

- e_i^k : QC k 에 할당된 i 번째 컨테이너
- K : QC 집합 (QC의 수, $nc=|K|$)
- d_i^k : 중단과 대기 등의 이상요인이 없이 순수하게 작업이 진행되는 경우 e_i^k 가 작업이 완료되는 시점, 즉 $d_i^k = \sum_{j=1}^{m_i} (t_{kj} + d)$. 여기서 t_{kj} 는 e_i^k 가 QC에 의해 컨테이너선에서 운반되는 시간이고, d 는 운반된 컨테이너를 야드트럭에 적재하는 시간을 나타낸다. d 가 모든 컨테이너에 대해 동일한 경우, $d_i^k = \sum_{j=1}^{m_i} (t_{kj}) + id$ 로 표현할 수 있다.
- V : 차량 집합 (차량의 수, $nv=|V|$)
- t_{ki}^j : 한 차량이 e_i^k 를 차량에 싣고 운반하여 내린 후, 다시 다음 작업 e_j^l (QC l 의 j 번째 컨테이너)을 운반하기 위해 QC로 돌아오는 시간
- m_k : QC k 에 할당된 컨테이너의 수 ($k \in K$).
- $K' = \{0\} \cup K$ (여기서 0 는 각 차량의 작업 시작 event)
- $K'' = \{F\} \cup K$ (여기서 F 는 각 차량의 작업 종료 event)

• 결정변수

$$x_{ki}^j = \begin{cases} 1 & \text{(동일한 야드트럭이 } e_i^k \text{를 운반한 후 바로 다음 작업으로 } e_j^l \text{를 운반하는 경우)} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$y_i^k : e_i^k \text{의 실제 작업 완료시간(컨테이너선에서 꺼내진 후 차량에 적재 완료되는 시점)}$$

<차량배차 최적화 모형>

$$\text{Minimize } \sum_{k \in K} y_{m_k}^k \tag{1}$$

Subject to

$$\sum_{i \in K'} \sum_{j=1}^{m_i} x_{ki}^j = 1 \quad \forall k \in K' \text{ and } i = 1, \dots, m_k \tag{2}$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i=1}^{m_k} x_{ki}^i = 1$$

$$\forall l \in K'' \text{ and } j = 1, \dots, m_l \quad (3)$$

$$y_j^i - (y_i^k + t_{ki}^i) \geq M(x_{ki}^i - 1)$$

$$\forall k \in K', l \in K'', i = 1, \dots, m_k$$

$$\text{and } j = 1, \dots, m_l \quad (4)$$

$$y_{i+1}^k - y_i^k \geq d_{i+1}^k - d_i^k$$

$$\forall k \in K \text{ and } i = 1, \dots, m_k - 1 \quad (5)$$

$$y_i^k \geq d_i^k \quad \forall k \in K \text{ and } i = 1, \dots, m_k \quad (6)$$

$$x_{ki}^i = 1 \text{ or } 0$$

$$\forall k \in K', l \in K'', i = 1, \dots, m_k$$

$$\text{and } j = 1, \dots, m_l \quad (7)$$

위 차량배치 최적화 모형의 목적식은 모든 컨테이너의 양하작업을 수행하기 위해 소요되는 시간을 최소화하는 것이다. 목적식에서 $y_{m_k}^k$ 는 QC k 가 처리하는 최종 컨테이너의 양하 완료 시간이고 이는

$y_{m_k}^k = d_{m_k}^k + \sum_{j=1}^{m_k} c_j^k$ 으로 표현될 수 있다(c_j^k 는 QC k 의 i 번째 컨테이너가 차량을 기다리는 시간이다). 여기서, $d_{m_k}^k$ 는 알려진 값이므로 QC의 총 작업시간(즉, 컨테이너를 양하하는 시간)을 최소화하기 위해서는 QC의 대기시간을 최소화해야 한다.

즉 목적식 (1)은 Minimize $\sum_{k \in K} \sum_{j=1}^{m_k} c_j^k$ 으로 표현할 수 있다. 제약식 (2)과 식 (3)은 각 컨테이너는 하나의 차량에 의해서 한번 운반된다는 조건이다. 제약식 (4)는 모든 차량에 대해 x_{ki}^i 의 값이 1인 경우에는, 즉 동일한 야드트럭이 e_i^k 를 운반한 후 바로 다음 작업으로 e_j^l 를 운반하는 경우에는 e_j^l 의 작업종료 시점은 e_i^k 의 작업종료 시점과 운반 작업을 완료하고 QC l 로 돌아오는 시간인 t_{ki}^i 를 합한 시점 이전에 수행될 수 없다는 조건이다. 즉, 하나의 차량은 한 시점에서는 하나의 컨테이너만을 운반할 수 있다는 조건이다. 제약식 (5)는 모든 QC에 대해 컨테이너 양하 작업 순서에 따라 작업이 진행되

어야 하고 한 시점에서 하나의 QC는 한 컨테이너만을 운반한다는 조건이다. 제약식 (6)은 실제 컨테이너가 양하되는 시점은 대기 없이 순수한 양하 예정시간 보다 작을 수 없다는 조건이다.

위에서 제시한 차량배치를 위한 최적화 모형은 현실적으로 복잡한 문제에서는 계획수립 시간이 많이 소모되므로 현장에서 사용하기는 쉽지 않다. 문제의 복잡성과 관련하여, Kim[6]은 QC 2대, 야드 트럭 4대, 야드블록 5곳으로 이루어진 간단한 가상 컨테이너 터미널에서 최적화 패키지가 계산시간과 컴퓨터메모리의 부족으로 해결하지 못하는 경우가 있음을 보고하고 있다. 또한 물류시스템의 가변성으로 인하여 디스패칭에 대한 결정은 시스템의 상태를 고려하여 실시간으로 결정하는 것이 일반적이다. 본 논문에서는 현실적인 문제의 접근법으로서 network flow에 의한 최적화 모형을 단계적으로 적용하는 배차 휴리스틱과 look-ahead 개념을 이용한 배차정책을 소개한다.

4. 차량배차 휴리스틱 알고리즘

4.1 VID 및 WID 배차 방법

앞에서 언급하였듯이 VID 배차방법은 차량이 운반작업을 마친 후 어떤 컨테이너를 운반할 것인가 하는 결정이고, WID는 운반대상이 준비되었을 경우 어떤 차량으로 운반될 것인가 하는 결정이다. 아래의 차량 배차 방법은 일반적으로 사용되거나 VID와 WID의 대표적인 배차정책을 포함한다. 특히 WID에서는 look-ahead 개념을 이용한 배차 방법을 소개한다.

QC전용 차량배차(DED : QC Dedicated Dispatching)
각 QC에 일정한 수의 차량을 미리 배정하고, 배정된 차량은 양하작업이 종료될 때까지 배정된 QC에서만 컨테이너를 운반한다. 이 방법은 최소한의 의사결정과 관리의 용이성 때문에 현장에서 가장 많이 사용되는 방법이다.

차량주도형 Greedy 차량배차(VIG : Vehicle Initiated Greedy Dispatching)

이 배차 정책은 차량이 운반작업을 완료하였을 때 QC에서 아직 할당되지 않은 컨테이너 중에서 가장 먼저 준비되는 컨테이너가 있는 곳으로 이동해서 해당 컨테이너를 운반하는 정책이다. 이는 차량의 위치와 각 QC에서의 다음 준비 시간에 대한 정보만 알면 의사결정이 가능한 방법으로 현장에서 비교적 어렵지 않게 적용할 수 있는 방법이다.

작업주도형 Look-Ahead 차량배차(CIL :

Container Initiated Look-Ahead Dispatching)

컨테이너가 QC에 의해서 준비되는 시점에서 모든 차량 중에서 가장 빠르게 도착하는 차량을 선택하는 방법이다. 여기서 고려하는 차량은 현재 작업을 수행 중인 차량도 함께 고려하고 이들 차량의 작업 종료시간은 현재상황을 고려하여 미리 예측(look-ahead)함으로써 얻어낸다. 이 방법은 의사결정을 위하여 정보통신 기술을 이용한 실시간 차량 및 물류 정보 획득 및 처리 시스템이 갖추어져 있어야 한다.

작업주도형 유휴차량배차(CII : Container Initiated Idle-vehicle Dispatching)

컨테이너가 QC에 의해서 준비되는 시점에서 유휴상태인 차량 중에서 가장 빠르게 도착하는 차량을 선택하는 방법이다. 유휴상태인 차량이 없는 경우에는 작업 중인 차량을 함께 고려하고, 이 경우는 CIL 방법과 동일한 과정을 거친다.

4.2 Network Flow 모형 기반의 차량 배차(NET)

컨테이너 양하작업은 QC의 작업순서가 이미 정해져 있으므로, 어느 한 시점에서 고려해야 할 컨테이너 수가 많지 않으므로 물류 데이터를 실시간으로 얻을 수 있다는 전제하에서 최적화 기법에 의한 차량배차도 빠르게 수행할 수 있다. 본 절에서는 network flow에 의한 최적화모형을 기반으로 하는 차량 할당 알고리즘(NET)을 소개한다. NET 알고리즘은 다음에 운반해야 할 컨테이너와 차량을 할당하여 고정시키고, 다음 의사결정 시점에서 컨테이너와 차량의 새로운 세트를 가지고 문제를 풀어나가는 rolling horizon 방법을 사용하고 있다. 의사결정 시점은 할당의 지연으로 인한 물류장비의 대기가 없도록 QC가 컨테이너를 운반하는 시간과

차량이 이동하는 시간을 고려하여 결정한다. NET의 절차는 다음과 같다.

4.2.1 초기 차량 배차

차량이 모두 QC에 위치한 상황에서 초기에 QC로 운반된 컨테이너를 운반함. 차량의 종류와 성능은 동일하므로 차량을 순서대로 배정.

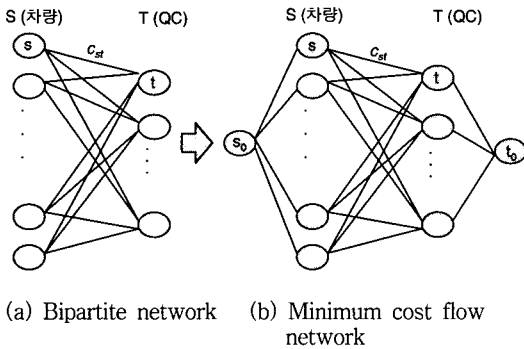
- <1> nc 대의 차량에 각 QC의 첫 번째 job 배정 (job은 운반 대상 컨테이너를 의미함.)
- <2> 남은 job들 중 가장 빨리 QC에 의해 운반되어 준비되는 job을 다음 차량에 할당
- <3> 모든 차량이 할당될 때까지.<2> 반복

4.2.2 순차적 차량 배차

한번의 의사결정 시점에서 nc 개의 컨테이너에 대한 차량 할당을 동시에 실시한다. 한번의 차량 할당이 이루어지면 이를 고정시키고 남아 있는 차량과 컨테이너를 가지고 새로운 세트의 문제를 구성하여 배차절차를 반복한다. 그 절차는 아래와 같다.

- <1> 차량 할당이 안 된 컨테이너 중에서 예상 시작 시간이 빠른 작업 nc 개를 선택한다.
- <2> mv 대의 차량의 집합(S)과 선택된 nc 개의 컨테이너의 집합(T)으로 이루어진 Bipartite Matching(BM) Network를 [그림 2(a)]와 같이 구성한다. BM 네트워크는 최소비용흐름(MCF : minimum cost flow) 네트워크의 특별한 형태이다. BM 네트워크를 MCF 네트워크로 변환하기 위하여 [그림 2(b)]와 같이 노드 s_0 와 t_0 를 도입한다. 구성된 Network에서 노드 s_0 의 순흐름은 $+nc$, 노드 t_0 의 순흐름은 $-nc$ 이고, 다른 모든 노드의 순흐름은 0이다. 모든 아크의 수용능력은 1이다. S와 T를 연결하는 아크에 대한 비용은 QC의 대기시간에 의하여 결정되고, s_0 와 S 및 t_0 와 T간의 아크에 대한 비용은 0이다.
- <3> 구성된 MCF 네트워크를 이용하여 최적 match를 구한다. 본 논문에서는 최적해를 구하기 위

하여 network simplex method를 이용하였다.
 <4> 최적 할당이 이루어지면 차량, 컨테이너 및 QC의 관련 데이터를 갱신한다. 후속작업에 대한 예상준비시간도 갱신한다. 모든 컨테이너가 차량에 할당될 때까지 단계 <2>부터 단계 <4>를 반복한다.



[그림 2] 차량과 QC의 컨테이너 간의 할당문제에 대한 네트워크 표현

상기의 절차는 반복적으로 최적해를 찾아 컨테이너를 차량에 할당한다. [그림 2]의 차량과 QC에 있는 컨테이너와 연결된 아크의 비용 c_{st} 는 차량 s 가 컨테이너 t 를 운반하는 경우 QC가 차량을 기다리는 시간이다. 차량 s 의 현 작업 완료시점을 tc_s , 차량 s 가 컨테이너 t 의 위치까지 공차로 운행하는 시간을 te_{st} , QC가 컨테이너 t 를 컨테이너선에서 꺼내오는 시점을 tu_t 라 하면 c_{st} 는 다음과 같다:
 $c_{st} = \max(tc_s + te_{st} - tu_t, 0)$. 여기서 할당의 목적은 의사결정 시점에서 모든 QC의 다음 작업을 수행하기 위해 차량을 기다리는 시간을 최소화 하는 것이다. 이는 다음의 할당문제로 표현할 수 있다.

$$\text{Minimize } \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} c_{st} z_{st} \quad (8)$$

Subject to

$$\sum_{s \in S} z_{st} = 1 \quad \forall t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{t \in T} z_{st} \leq 1 \quad \forall s \in S \quad (10)$$

$$z_{st} = 0, 1 \quad \forall s \in S, t \in T \quad (11)$$

여기서 z_{st} 는 차량 s 와 다음 작업 t 의 할당여부를 나타내는 변수이다. 3.1절의 최적화 모형에서 언급했듯이, QC k 가 모든 작업을 완료하는 시간($y_{m_k}^k = D_{m_k}^k + \sum_{j=1}^{m_k} c_j^k$)을 최소화하기 위해서는 $\sum_{j=1}^{m_k} c_j^k$ 를 최소로 해야 한다. 여기서 $c_j^k = \sum_{s \in S} c_{st} z_{st}$, $t \in e_j^k$ 로 표현된다. QC k 가 운반해야 할 컨테이너의 집합을 T^k 라 하면, 위 모형의 목적식 $\sum_{s \in S} \sum_{t \in T^k} c_{st} z_{st}$ 는 QC k 가 차량을 기다리는 총시간이 된다. 따라서 위의 최적화 모형은 현 시점에서의 QC의 대기시간을 최소화 하는 모형이다.

5. 수치예제 및 시스템 구현

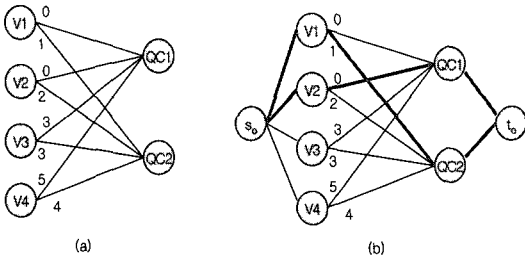
본 절에서는 2대의 QC와 4대의 차량으로 구성된 간단한 컨테이너터미널을 이용하여 앞 절에서 제시한 컨테이너차량 배차 방법을 설명한다. <표 1>은 예제 모형의 상황을 나타내고 있다.

<표 1> 예제 모형(단위 : 분)

QC	다음컨테이너 준비시간	차량이 현작업 종료후 QC에 도착하는 시간 (차량대기시간)			
		V1	V2	V3	V4
QC1	3	2 (0)	3 (0)	6 (3)	8 (5)
QC2	4	5 (1)	5 (2)	7 (3)	8 (4)
차량의 현작업 종료시간		0	2	1	3

현 상황을 bipartite matching network로 표현하면 [그림 3]과 같다. 각 아크와 연관된 수치는 차량과 QC의 컨테이너가 할당되는 경우에 QC에서 차량을 대기하는 시간을 나타내는 것으로서, 예를 들어 차량 V1이 QC2에 있는 컨테이너를 운반하는 경우, V1이 시간 0에서 현재의 작업을 완료한 후($tc = 0$) QC2까지 5분 동안 ($te = 5$) 공차 운행하여 도착한다. QC2에서는 컨테이너가 4분 후에 준비되므로 ($tu = 4$) QC는 1분 동안 차량을 기다린다 : 즉, V1과 QC2의 노드번호를 1과 6이라고 한다면, $c_{16} = \max$

$(0 + 5 - 4, 0) = 1$. 예제모형의 상황에서 각 차량배차 방법을 적용하는 경우의 배차 결과는 아래와 같다.



[그림 3] 예제 문제의 (a) bipartite 표현과 (b) network simplex method에 의한 해

QC전용 차량배차(DED : QC Dedicated Dispatching)
 차량 V1과 V2는 QC1을 위해서만 운행되고, 차량 V3과 V4는 QC2에 전용으로 사용되는 경우, QC1은 V1에 의하여, 그리고 QC2는 V3에 의해 컨테이너가 운반되고 이때의 차량대기시간은 QC2에서 3분 동안 발생한다.

차량주도형 Greedy 차량배차(VIG : Vehicle Initiated Greedy Dispatching)

이 경우에는 차량 V1이 QC1에 할당되고, 다음에 차량 V3이 QC2에 할당된다. 이때의 차량대기시간은 QC2에서 3분 동안 발생한다.

작업주도형 Look-Ahead 차량배차(CIL : Container Initiated Look-Ahead Dispatching)

QC1이 컨테이너 준비시간이 빠르므로 먼저 선택권이 주어진다. 차량 V1과 V2로 컨테이너가 운반되는 경우 모두 대기시간은 발생하지 않지만, 둘 중에서는 먼저 작업이 완료되는 차량을 선택한다. 다음 QC2는 대기시간을 최소화하는 차량 V2를 선택할 것이다. 이때의 차량대기시간은 QC2에서 2분 동안 발생한다.

작업주도형 유후차량배차(CII : Container Initiated Idle-Vehicle Dispatching)

CIL과 컨테이너가 QC에서 준비되었을 때 작업이 완료된 차량 중에서만 선택한다. 이 예에서는 CIL과 같은 결과가 나온다.

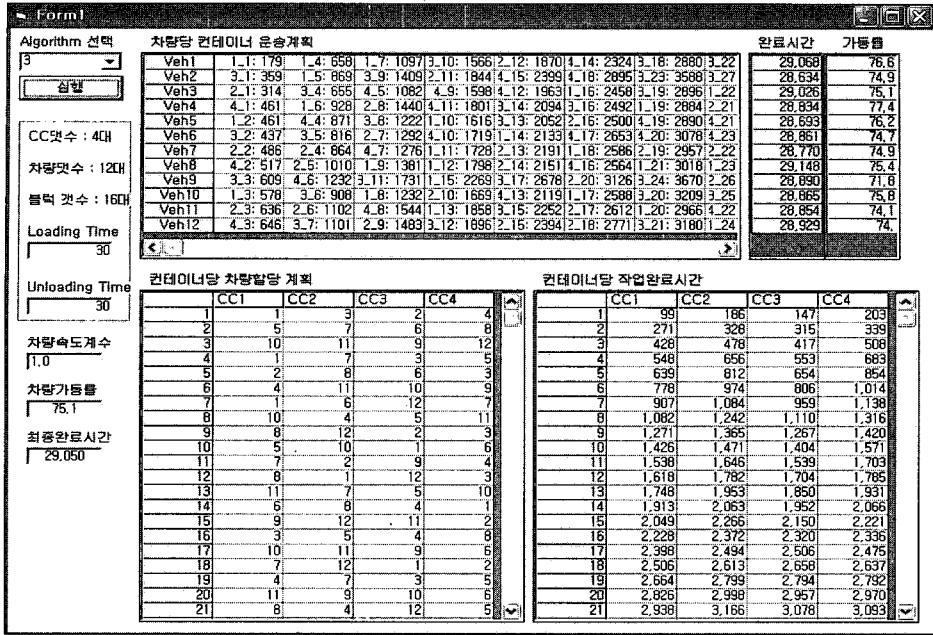
Network Flow 최적화 모형을 기반으로 하는 차량 배차(NET)

최소비용흐름 최적해 알고리즘인 network simplex method에 의해 차량배차가 결정된다. 이 예에서는 V1은 QC2를 담당하고, V2는 QC1을 담당하는 것이 최적이고 이때의 차량대기시간은 QC2에서 1분 동안 발생한다.

본 논문에서 소개된 차량배차 알고리즘은 Visual Basic으로 구현되었다. 알고리즘의 수행을 위하여 필요한 데이터는 각 QC별 컨테이너 양하 순서, 각 컨테이너의 목적지 및 QC의 컨테이너 운반시간, 야드트럭의 수, QC의 수, 야드블록의 수, 두 지점 간의 차량 이동 시간 및 차량에 컨테이너를 적재하고 내리는 시간이 포함된다. [그림 4]는 알고리즘을 수행한 결과 화면이다. 결과화면에는 차량별로 운반해야할 컨테이너의 순서가 나타나 있고, 각 차량의 운반작업 완료시간이 나타나 있다. 또한 QC 별로도 컨테이너를 운반하는 차량의 순서를 나타내고 각 작업의 완료시간을 보여준다. 예를 들어 차량 3은 QC2의 첫 번째 컨테이너, QC3의 네 번째 컨테이너, QC4의 5번째 컨테이너 순으로 운반작업을 수행한다. 차량의 속도계수는 차량의 속도가 변하는 경우의 수행도 변화를 알아보기 위하여 선택할 수 있도록 하였다. 최종완료시간은 양하 작업을 시작한 시점에서부터 모든 컨테이너가 컨테이너선에서 양하하고 마지막 컨테이너가 QC로부터 차량에 인도되는 순간까지의 시간이다. 알고리즘선택 항목은 목록으로 구성되어 앞 절에서 논의된 모든 차량 배차정책을 선택하도록 되었다.

6. 실험 및 결과 분석

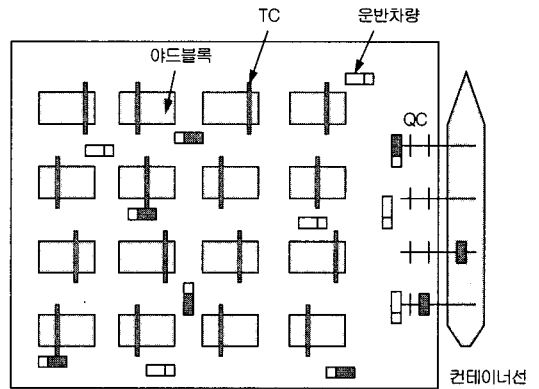
본 절에서는 소개된 차량 배차 알고리즘들의 성능을 검증하기 위하여 수행된 실험의 결과에 대해 설명한다. [그림 5]는 실험에 이용된 모델 컨테이너 터미널이다. QC의 수, QC의 작업시간, 야드블록 수, 야드트럭의 수 및 지점간의 차량운행 시간 등의 데이터는 윤원영 등[4, 5]을 참조하였다. 시스템은 4대의 QC가 컨테이너선에서 컨테이너를 꺼내와 차량에 올려놓는다. 각 QC는 400개의 컨테이너를 하역하고, 하역 순서는 이미 정해져 있다고 가정한다. 차량은 모두 12대로 구성되어 있다. 차량을 QC에 미리 배정하는 DED 방법을 사용하는 경우는 각 QC에 3대의 차량이 배정된다. 컨테이너는 차량에 의해 16곳의 야드블록 중 정해진 목적지로



[그림 4] 알고리즘 수행 초기 화면

운반된다. QC와 야드블록 사이의 차량 이동시간은 최소 80초, 최대 260초로 QC와 야드블록의 거리에 따라 다르다. 차량의 이동 시간은 안벽을 기준으로 한 블록을 수직으로 이동하는 데는 40초, 수평으로 이동하는 데는 20초를 가정하였다. 운반된 컨테이너는 TC에 의해 들어올려져 야드블록 내의 한 곳에 저장된다. 하나의 운반작업을 마치면 컨테이너가 TC에 의해 운반되면 차량은 유힘한 상태로 되고 차량 배차 정책에 따라 QC 중 한곳으로 이동한다. 이러한 차량 및 QC의 활동이 모든 컨테이너가 선박에서 양하될 때까지 계속된다. QC가 컨테이너 작업하는 시간은 윤원영 등[4]이 실제 컨테이너 터미널 자료를 분석한 N(112.8초, 31.2초)을 이용하였다. 양하작업 시간은 QC가 처음으로 컨테이너를 꺼내기 위해 운반하는 시점에서 시작하여 마지막 컨테이너를 차량에 올려놓는 시간으로 정의된다. 운반계획이 차량배차 방법의 수행도에 영향을 줄 수 있으므로 모든 실험은 임의로 생성된 10개의 컨테이너 운반 시나리오를 대상으로 하였다. 펜티엄 4 PC에서 각 배차방법에 의해 작업을 수행하는 실

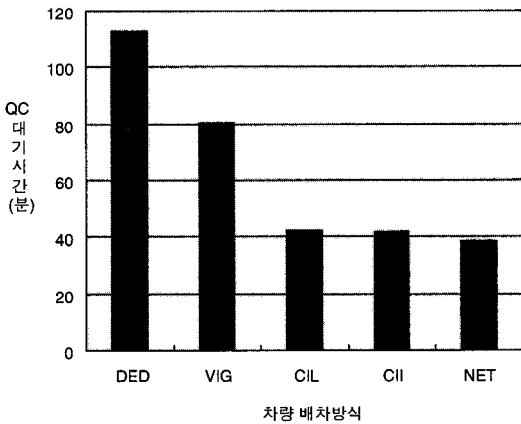
험을 통하여 결과를 얻는데 수초 이내의 시간이 소요되었다.



[그림 5] 실험에 이용된 컨테이너 터미널

상기의 상황에서 앞 절에서 기술된 차량배치방법을 이용하여 컨테이너 터미널을 운영하는 경우의 QC의 차량대기시간이 [그림 6]에 주어져 있다. 그림에서 각 QC에 차량을 고정적으로 배차하는 DED 방법을 사용하는 경우 QC가 가용한 차량을 기다리

며 대기하는 시간이 가장 많고(평균 113분), 따라서 가장 오랜 시간 동안 작업하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 모든 차량을 QC에 미리 고정적으로 배정하여 운영하는 방식보다는 차량 자원을 모든 QC에서 공동으로 이용하는 것이 대기시간을 줄일 수 있다는 결론을 얻을 수 있고, 이는 대기이론(queueing theory)에 의하여 설명될 수 있다. 실험의 결과는 또한 차량주도형 배차방법을 이용한 VIG(평균 80분) 보다 작업주도형 배차방법인 CIL 및 CII(평균 42분)가 더 좋은 결과를 제공함을 알 수 있다. 이는 의사결정을 차량 중심으로 하는 것보다 컨테이너 즉 QC를 중심으로 해야 한다는 것을 보여준다. 차량의 배차방법 중 가장 좋은 결과를 주는 것은 NET 방법(평균 38분)이다. NET 방법에 의한 배차는 DED와 VIG 방법보다는 QC의 대기시간을 많이 줄일 수 있고, CIL이나 CII보다는 근소한 차이로 좋은 결과를 보여준다.



[그림 6] 차량배차 방법에 따른 (a) 총작업완료시간 및 (b) QC의 차량대기시간 비교

각 배차방법의 수행도의 차이를 통계적으로 비교하기 위하여 가설 검정을 수행하였다. 실험결과인 z -검정통계량을 <표 2>에 보여주고 있다. 귀무가설은 $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$ 이고 대립가설은 $H_1: \mu_1 - \mu_2 < 0$ 이다. 여기서 μ_1 와 μ_2 는 비교하는 배차방식을 사용하는 경우 QC의 평균대기시간이다. 예

를 들어 VIG-DED 비교의 경우에 μ_1 은 VIG 하에서 QC의 평균대기시간이고, μ_2 는 DED 하에서 QC의 평균대기시간이다. 유의수준 α 를 0.05로 가정하면, z -검정통계량이 -1.645 미만이면 귀무가설이 기각되고, 대립가설이 채택된다. z -검정통계량은 다음의 식에 의해 구한다.

$$z = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\sigma_1^2/n_1 + \sigma_2^2/n_2}}$$

여기서 \bar{x}_1 과 \bar{x}_2 , σ_1^2 과 σ_2^2 , n_1 과 n_2 는 비교하는 배차방식 하에서의 실험 결과의 평균, 분산 및 실험 횟수를 나타낸다. <표 2>의 가설검정 결과에서, 각 차량을 일정한 QC에 고정적으로 배정하여 운영하는 DED방식 보다는 차량을 공동으로 사용하는 VIG방식과 CIL방식이 통계적으로 좋은 결과를 주고 있다. 또한 차량주도형 배차(VIG)보다는 작업주도형 배차(CIL)가 좋은 결과를 준다. 그러나 컨테이너가 준비되는 시점에서 유휴중인 차량뿐 아니라 작업 중인 차량까지도 의사결정에 포함하는 CIL방법은 가용한 차량만 고려하는 CII방법보다 좋은 결과를 낸다고 볼 수는 없다는 결과를 얻었다. 마지막으로 가장 결과가 좋은 NET와 CIL을 비교한 결과 NET방법이 CIL보다 유의수준 0.05에서 더 좋은 결과를 보여주고 있다.

위의 실험은 차량의 수를 12대로 고정하고(이때의 차량 부하율은 약 86%) 여러 배차 정책을 비교하고 있다. 차량의 부하율은 총 작업시간 중에서 차량이 적차 또는 공차로 이동하는 시간과 컨테이너를 적차하고 하차하는 시간 합에 비율로서 정의된다. 차량의 부하율은 차량의 수, 차량의 속도, QC의 양하 속도 등에 의해서 변한다. 차량의 부하율이 각 차량배차 정책의 수행도에 어떤 영향을 주는지 알아보기 위하여 차량의 대수를 변화시키면서 실험을 수행하였다. 차량의 수는 DED의 경우에 4대의 QC에 동일한 수의 차량을 배정하기 위하여 12대, 16대, 20대를 가지고 실험하였다. <표 3>은 차량의 수가 변함에 따라 각 배차방법의 수행도를 보여주

〈표 2〉 각 배차방식의 상호 비교

	VIG-DED	CIL-DED	CIL-VIG	CIL-CII	NET-CIL
z-검정통계량	-28.80	-61.06	-41.21	-0.02	-3.24

〈표 3〉 차량 대수의 변화에 따른 QC 대기시간 비교

(단위: 분)

차량 댓수	DED	VIG	CIL	CII	NET
12대	112.7	80.3	42.1	42.1	38.6
16대	11.4	1.3	0.1	0.1	0.1
20대	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0

〈표 4〉 차량 대수의 변화에 따른 배차방식의 통계적 검증(z-검정통계량)

차량 댓수	VIG-DED	CIL-DED	CIL-VIG	CIL-CII	NET-CIL
12대	-28.80	-61.06	-41.21	-0.02	-3.24
16대	-17.36	-20.05	-9.27	0.0	-0.47
20대	-3.40	-3.40	0.0	0.0	0.0

고, <표 4>는 주요 배차 방법을 통계적으로 비교하기 위하여 검증을 수행하여 z-검정통계량을 구한 것이다. 12대의 차량을 운영하는 경우는 앞에서 설명하였다. 실험결과 16대의 차량을 이용하면 차량의 부하율이 약 70%로 된다. 이는 차량의 가용시간의 약 30%는 운반할 컨테이너가 없어 유휴한 상태라는 것을 말해준다. 이 경우에도 DED는 다른 방법보다 좋지 않은 결과를 보여주고 있다. 또한 <표 4>에서 CIL과 VIG의 비교 결과 z값이 -9.27로 CIL이 유의수준 0.05에서 VIG보다 좋은 결과를 산출함을 알 수 있다. 그러나 이때의 차이는 <표 3>에서 보여주는 것과 같이 1.3분에 불과하다. CIL과 CII의 수행도는 차량의 대수에 관계없이 동일한 결과를 보여주고 있다. NET와 CIL을 비교하는 실험에서는, 차량의 수가 12대인 경우에는 NET의 수행도가 우수하지만 차량의 수가 16대인 경우에는 수행도에 있어 통계적인 차이가 없다. 이는 차량의 수가 증가하면 차량 부족으로 운반지연이 발생하는 경우가 줄어들고, 결국 차량의 효율적 운영이 시스템에 미치는 영향이 줄어들기 때문이다. 따라서 이때는 최적화모형을 기반으로 하는 NET와 더불어 관리가 상대적으

로 쉬운 CII나 CIL방법도 유용한 방법이라 판단된다. 차량 대수가 20대인 경우에는 차량 부하율이 56%로 감소하여 컨테이너가 운반해야 할 시점에는 QC 앞에 거의 항상 차량이 대기할 수 있을 것이다. <표 3>에서 차량 대수가 20대인 경우 배차방법과는 무관하게 QC의 중단이 거의 없이 작업이 진행됨을 보여주고 있다. 따라서 이러한 경우에는 운영이 가장 간단한 DED 방법도 대안으로 고려할 수 있다.

7. 결 론

본 논문에서는 컨테이너 터미널에서 양하작업을 수행할 때 선박으로부터 야드장으로 컨테이너를 운반하는 차량의 배차 문제를 다루었다. 컨테이너 터미널에서 중요한 생산성 목표는 컨테이너선에 적재되어 있는 컨테이너를 빠르게 처리하여 선박이 안벽에 접안하는 시간을 최소화 하는 것이다. 본 논문에서는 컨테이너 양하시간을 최소화하기 위하여 network flow 모형 기반의 배차 방법을 소개하였다. 이 방법은 차량과 운반될 컨테이너로 network로 구성하여 QC의 대기시간이 최소가 되도록 차량

배차를 결정하는 것이다. 또한 차량과 물류작업의 미래 상태를 예측하여 의사결정에 반영하는 look-ahead 개념을 이용한 배차방법을 소개하였다.

실험을 통하여 여러 가지 배차 방법의 수행도를 비교분석 하였다. 실험 결과 산업계에서 널리 사용되는 QC전용 차량배차방법(DED)은 차량의 부하율이 적은 경우에만 적절한 방법으로 분석되었다. 일반적으로 컨테이너 터미널에서는 컨테이너선에 배정되는 야드트럭의 수가 제한적이다. 특히 터미널에 있는 모든 QC가 작업하는 경우에는 QC와 야드트럭 간에 컨테이너를 운반하는 야드트럭의 부하율이 높아진다. 이처럼 부하율이 높은 경우에는 network flow 최적모형 기반의 배차 방법(NET)이 가장 좋은 결과를 보였다. 그러나 차량이 증가되어 부하율이 줄어들수록 look-ahead를 기반으로 하는 작업주도형 배차방법(CIL)의 수행도가 NET의 수행도에 근접하는 결과를 보이고 있다. 차량이 작업을 마친 후 다음 작업을 선택하는 차량주도형 배차방법(VID)과 다음에 운반될 컨테이너가 운반할 차량을 선택하는 작업주도형 배차방법(WID)을 비교한 결과 look-ahead 개념을 도입한 WID가 더 좋은 수행도를 보였다.

컨테이너 터미널에서의 물류활동은 여러 하부 물류 활동으로 이루어져 있다. 본 논문에서 다룬 선박과 야드장 간의 컨테이너 운반은 전체 물류 흐름 중의 일부이다. 본 논문에서 목표로 하는 양하 시간 최소화를 위해서는 차량배차 문제 이외에도, QC 할당문제, 컨테이너 작업순서계획, 컨테이너 보관위치, 차량경로계획, QC 및 야드 트럭의 형태, 야드장 배치 등의 문제가 존재하고, 터미널의 효율화를 극대화를 위해서는 이러한 문제를 종합적으로 해결해야 한다.

참 고 문 헌

- [1] 구평희, 서정대, 장재진, "반도체 Intra-Bay 물류시스템에서의 차량 배차", 『IE Interfaces』, 제16권(2003), pp.93-98.
- [2] 삼성경제연구소, 「물류산업의 현황과 과제」, 2003.
- [3] 윤동환, 최종희, 최상희, "컨테이너 화물 반출에 약제 도입 연구", 『한국해양수산개발연구원』, 2001.
- [4] 윤원영, 안창근, 최용석, 김갑환, "시뮬레이션을 이용한 컨테이너 터미널의 운영계획 평가", 『한국시뮬레이션학회지』, 제7권, 제2호(1998), pp. 91-104.
- [5] 윤원영, 최용석, 송진영, 안창근, "컨테이너 터미널에서 컨테이너 크레인의 하역능력 추정에 관한 시뮬레이션 연구", 『IE Interfaces』, 제14권, 제1호(2001), pp.67-78.
- [6] Bae, J.W. and K.H. Kim, "A Pooled Dispatching Strategy for Automated Guided Vehicles in Port Container Terminals," *International Journal of Management Science*, Vol.6, No.2(2000), pp.47-67.
- [7] Bish, E.K., "Theoretical Analysis and Practical Algorithms for Operational Problems in a Mega Container Terminal," Ph.D. Dissertation, Northwestern University, USA, 1999.
- [8] Bish, E.K., T. Leong, C. Li, J.W.C. Ng and D. Simchi-Levi, "Analysis of a New Vehicle Scheduling and Location Problem," *Naval Research Logistics*, Vol.48(2001), pp.363-385.
- [9] Bartholdi, J.J. and L.K. Platzman, "Decentralized Control of AGVs on a Simple Loop," *IIE Transactions*, Vol.21, No.1(1989), pp.76-81.
- [10] Bozer, Y.A and C.K. Yen, "Intelligent Dispatching Rules for Trip-based Material Handling Systems," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.15, No.4(1996), pp.226-239.
- [11] Egbelu, P.J. and J.M.A. Tanchoco, "Characterization of AGV Dispatching Rules," *International Journal of Production Research*, Vol.22, No.3(1984), pp.359-374.

- [12] Grunow, M., H.O. Gunther and M. Lehmann, "Dispatching Multi-load AGVs in Highly Automated Seaport Container Terminals," *OR Spectrum*, Vol.26, No.2(2004), pp.211-235.
- [13] Han, M.H. and L.F. McGinnis, "Control of Material Handling Transporter in Automated Manufacturing," *IIE Transactions*, Vol.21, No.2(1989), pp.184-190.
- [14] Hwang, H. and S.H. Kim, "Development of Dispatching Rules for Automated Guided Vehicle Systems," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.17, No.2(1998), pp.137-143.
- [15] Kim, C.W., J.M.A. Tanchoco, and P.H. Koo, "AGV Dispatching Based on Workload Balancing," *International Journal of Production Research*, Vol.37, No.17(1999), pp.4053-4066.
- [16] Kim, K.H and J.W. Bae, "A Dispatching Method for Automated Guided Vehicles to Minimize Delays of Containership Operations," *International Journal of Management Science*, Vol.5, No.1(1999), pp.1-25.
- [17] Lim, J.K., K.H. Kim, K. Yoshimoto, J.H. Lee, and T. Takahashi, "A Dispatching Method for Automated Guided Vehicles by Using a Bidding Concept," *OR Spectrum*, Vol.25, No.1(2003), pp.25-4.
- [18] Sabuncuoglu, I. and D.L. Hommertzheim, "Dynamic Dispatching Algorithm for Scheduling machines and AGVs in a FMS," *International Journal of Production Research*, Vol.30, No.5(1992), pp.1059-1079.
- [19] Taghaboni, F., *Scheduling and Control of Manufacturing Systems with Critical Material Handling*, Ph.D. Thesis, West Lafayette, Indiana, USA, 1989.
- [20] Vis, I.F.A. and R. Koster, "Transshipment of Containers at a Container Terminal : an Overview," *European Journal of Operational Research*, Vol.147(2003), pp.1-16.