

컨테이너 터미널 운영을 위한 의사결정시스템 설계의 최적화에 관한 연구

홍 동 희[†] · 정 태 충^{††}

요 약

컨테이너 터미널에서는 매일 24시간, 365일 운영하는 데에 있어서 다양한 의사결정을 필요로 하며, 이 모든 의사결정들은 상호 관계를 가지게 된다. 이러한 의사결정의 궁극적인 목표는 선박 작업시간, 작업 처리를 위해 사용되는 자원들, 터미널 내부 도로의 혼잡도 등을 최소화하는 것이다. 또한 필요한 저장 공간을 효율적으로 이용하는 것이다. 따라서 컨테이너 터미널의 운용 효율을 더 한층 강화하기 위해서는 이러한 의사결정의 범위와 복잡성이 더해지게 되어 의사결정 도구의 필요성이 강조될 수 밖에 없다. 이 논문은 이러한 목적을 위해 의사결정시스템을 위한 평가요소들을 도출하고, 의사결정시스템 설계에 가장 큰 영향을 주는 평가요소, 즉 야드장차장 배정, RTGC 배정, QC당 YT 배정의 최적화 전략을 제안한다. 그리고 G2언어를 사용한 시뮬레이션에 의해 의사결정시스템 설계의 효율성을 선박작업시간 비교를 통하여 평가한다.

A Study On Optimized Design of Decision Support Systems for Container Terminal Operations

DongHee Hong[†] · TaeChoong Chung^{††}

ABSTRACT

Container terminals need various decisions in the course of daily -24 hour and 365 day- operations, and all these decisions are inter-related. The ultimate goal of Decision Support System is to minimize ship loading/unloading time, resources used to handle the workload, and congestion on the roads inside the terminal. It is also to make the best possible use of the storage space available. Therefore, the necessity of decision support tools are emphasized to enhance the operational efficiency of container shipping terminals more, because of limits and complexity of these decisions. So, in this paper, we draw evaluation items for Decision Support Systems and suggest optimization strategy of evaluation items which have the greatest influence on Decision Support Systems, that is, yard stacking allocation, RTGC deployment among blocks, and YT allocation to QCs. We also estimate the efficiency of Decision Support System design by simulation using G2 language, comparing ship loading/unloading time.

키워드 : 컨테이너 터미널(Container Terminals), 양적하(Loading/Unloading), 최적화(Optimization), 장치공간할당(Storage Space Allocation), 크레인 배치(Crane Deployment), 의사결정시스템(Decision Support Systems)

1. 서 론

컨테이너 터미널은 선박이 부두에 집안하여 수입 컨테이너 화물을 양하(unloading)하고 수출 컨테이너 화물을 적하(loading)하는 곳이다. 따라서 컨테이너 터미널에는 이러한 컨테이너 화물들이 터미널을 빠져나갈 때까지 일시적으로 장치할 넓은 야드가 있다. 컨테이너는 직육면체로, 20×8×8.5 혹은 9.5의 크기의 단위를 TEU(20ft. Equivalent Units)라 하며, 그 크기의 2배인 컨테이너는 FEU(40ft. Equivalent Units)라

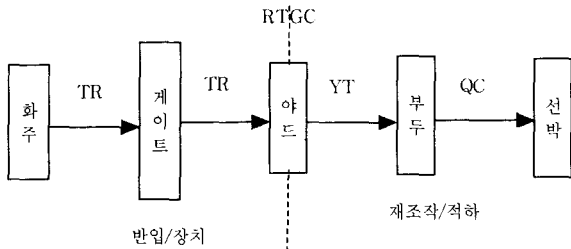
는 단위를 붙인다. 그러나 컨테이너 터미널의 수용능력의 계산에는 TEU 단위를 기준으로 한다.

야드에는 여러 개의 직사각형의 블록으로 나뉘어져 있으며, 각 블록은 일반적으로 야드의 규모에 따라 여러 개(20~50개)의 베이(Bay)로 이루어진다. 각 베이에는 컨테이너를 6열로 4단까지 장치하며, RTGC(Rubber Tyred Gantry Cranes)를 사용하여 컨테이너를 들어 올리거나 장치를 한다. 따라서 RTGC가 제자리에서 취급할 수 있는 컨테이너는 총 24개(6열×4단적)가 된다.

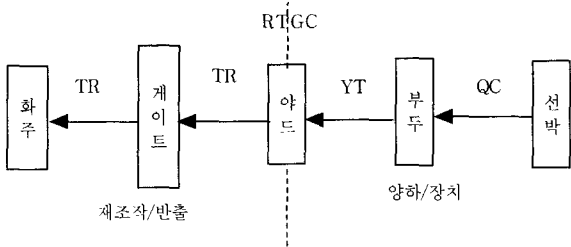
RTGC는 전후진을 하며 블록내의 모든 컨테이너를 취급하는데, 외부트럭이나 야드트랙터가 RTGC의 한쪽 안으로

[†] 정희원 : 동원대학 e 비즈니스과 교수
^{††} 정태충 : 경희대학교 컴퓨터공학과 교수
논문접수 : 2003년 6월 4일, 심사완료 : 2003년 9월 5일

진입하여 컨테이너를 운반한다. 수출 컨테이너인 경우는 (그림 1)에 나타낸 바와 같이 외부트럭이 화물을 싣고 오면 RTGC가 외부트럭에 실린 컨테이너를 집어 야드에 장치하며, 수입 컨테이너인 경우는 (그림 2)와 같이 RTGC가 화물을 집어 외부트럭에 실어준다[2].



(그림 1) 수출 컨테이너의 흐름(TR = 외부트럭, YT = 야드트랙터, QC = Quay Crane)



(그림 2) 수입 컨테이너의 흐름

또한 일정시간이 경과한 후 해당 선박이 도착하게 되는데, 이때는 수입 컨테이너를 선박에서 QC 장비에 의해 전달받은 야드트랙터가 싣고 오면 RTGC가 화물을 야드에 장치하며, 반대로 수출 컨테이너인 경우 RTGC가 화물을 집어 야드트랙터에 실어 주면 야드트랙터가 선박 쪽으로 이동하여 QC에 의해 적하된다.

이 연구는 부산항의 컨테이너 터미널 운영의 최적화를 위한 의사 결정 시스템을 설계하는 데 있다. 우리나라는 대부분의 컨테이너 화물이 부산항에 집중되고 있어 현재 수준으로는 그 수요를 충족시킬 수 없기 때문에 보다 효율적인 방안을 필요로 하며, 그에 대한 최선의 대안이 항만시설의 확충과 효율적인 운영을 위한 의사결정시스템의 개발이라고 할 수 있다. 따라서 이러한 목적을 위해 의사결정시스템을 위한 평가요소들을 도출하고, 의사결정시스템 설계에 가장 큰 영향을 주는 평가요소, 즉 야드장치장 배정, RTGC 배정, QC당 YT 배정의 최적화 전략을 제안한다. 그리고 G2 언어를 사용한 시물레이션에 의해 의사결정시스템 설계의 효율성을 선박작업시간 비교를 통하여 평가하고자 한다. 부산항에는 신선대, 자성대, 감만, 신감만, 우암 등 5개의 컨테이너 터미널이 있는데, 이 연구에서는 그 중 하나인 신선대 부두를 대상으로 한다.

2. 관련 연구

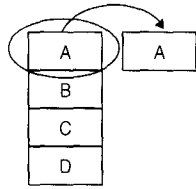
컨테이너 터미널 운영의 효율성과 관련된 연구로는 야드 장치장에서 컨테이너 화물의 장치위치 결정과 관련된 연구로서 McDowell이 처음으로 수입 컨테이너를 대상으로 재취급 문제를 분석하였고[1], Chung이 컨테이너 취급장비의 가동률을 향상시키기 위해서 에이프런(Apron) 지역에 완충 공간을 활용하는 방안을 제안, 시물레이션을 통해서 그 전략의 성능을 평가하였으며[2], Taleb-Ibrahimi가 컨테이너 터미널에서 장치공간을 할당하는 여러 가지 전략을 제시하였다[3]. 그리고 Watanabe는 수입 컨테이너의 장치장에서 재취급의 횟수를 추정하는 간단한 방법을 제시하였고[4], 같은 문제가 Kim에 의해서 다루어졌으며[5], Watanabe의 추정절차 대신에 간단한 공식이 제시되었다[4, 5]. Castilho도 재취급의 추정방식을 제시하고 수입 컨테이너 장치장에서의 여러 가지 저장전략에 따른 취급시간을 추정하는 방법을 제시하였다[6]. 또한 김갑환에 의해 컨테이너 무게를 고려한 수출 컨테이너의 장치위치를 결정하는 연구가 이루어졌다[7]. 야드 장치장 계획 및 운영에 관한 연구로는 김갑환, 박영만은 컨테이너 터미널에서 수평 배치인 수동터미널에서 수출, 수입 컨테이너의 장치장할당에 관한 연구와, 수직 배치의 경우 한 블록을 수입/수출 영역으로 나눈 뒤, 수출의 경우 체류시간이 짧은 것은 근접구간에, 중간인 것은 중간구간에, 긴 것은 먼 구간에 나누어 할당하는 방법을 제시하였고, 양하의 경우 선석의 반대쪽에 할당하는 방안을 제시하였다[8]. 또한 이종술은 수평배치 장치장에서 선박의 체류시간을 단축시킴으로 터미널의 생산성 향상을 위한 수출 장치장에서의 공간할당 문제를 다루었다. 블록과 선석의 거리, TC(Transfer Crane)의 장비 특성, 블록의 상대적 특성, TC의 간섭 방지, 컨테이너 그룹 조건, 컨테이너의 크기를 제약 조건으로 수출 컨테이너의 장치 위치를 할당하는 연구를 수행하였다[9].

3. 야드의 효율적 운영

3.1 RTGC의 운영

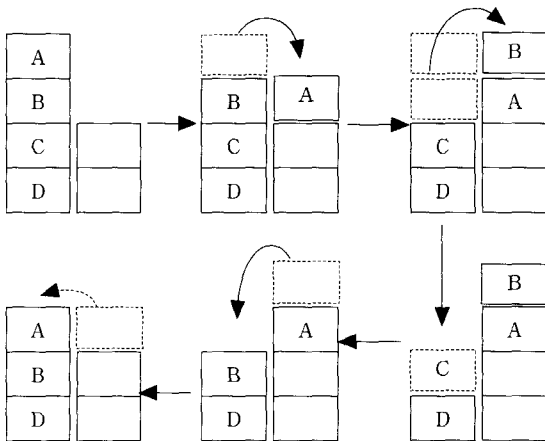
RTGC는 야드에서 컨테이너를 취급하는데 매우 효율적인 장비이다. 블록 내에서 작업을 하는 RTGC는 TRs 또는 YTs로부터 컨테이너를 받아 야드의 해당 장치위치에 놓거나, 해당 컨테이너를 집어 실어준다. TRs이나 YTs는 RTGC가 블록 내에서 작업중일 때 끊임없이 도착하므로 자신의 차례가 될 때까지 일렬로 기다리게 된다. 따라서 RTGC가 효율적으로 작업을 하지 못할 경우 블록 근처에 TRs이나 YTs들의 혼잡을 초래하게 된다. 또한 RTGC의 비효율적인 작업은 선박에서 양적하작업을 수행하고 있는 QC의 작업에 까지도 영향을 미치게 된다. RTGC의 컨테이너 취급 작업

에는 다음과 같이 조작과 재조작의 2가지 형태가 있다.



(그림 3) 스택에 장치되어 있는 4개의 컨테이너

- 조작 : 해당 위치의 컨테이너를 곧바로 집어서 TRs이나 YTs로 실어주는 작업이다. 만일 (그림 3)에서 A 컨테이너인 경우, 바로 RTGC가 집어서 실어줄 수 있다.
- 재조작 : 만일 A가 아닌 다른(B, C, D) 컨테이너를 집어내어 TRs이나 YTs에 신고자 할 경우, 해당 컨테이너 위의 스택에 있는 모든 컨테이너들을 다른 스택으로 옮기는 작업이 필요하다. 그리고 난 후에 해당 컨테이너를 집어 주고, 다시 옮겼던 컨테이너를 자신의 스택으로 다시 옮기는 작업이 발생하게 된다. 예를 들면 (그림 4)에서 컨테이너 C를 집어내려고 한다면 그 위에 있는 A와 B의 컨테이너를 다른 스택의 위로 옮긴 다음, C를 집어낸 후 B와 A를 원래의 스택으로 되돌린다.

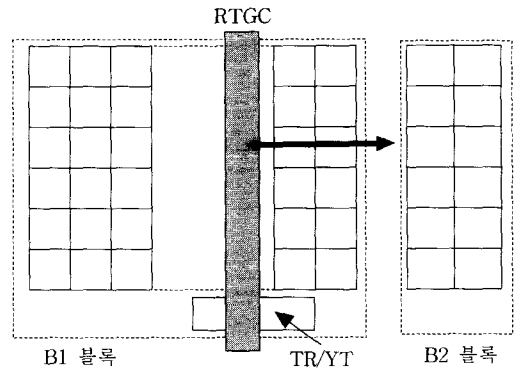


(그림 4) 재조작 컨테이너 처리 과정

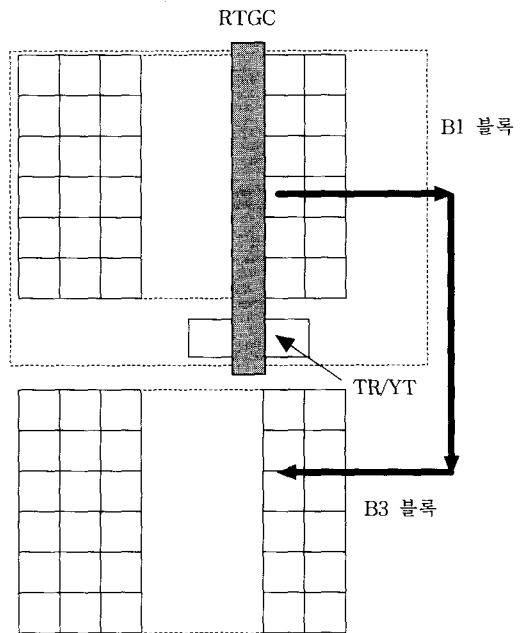
이처럼 재조작의 횟수는 도착된 컨테이너를 어떻게 장치하느냐 하는 전략과 밀접한 관계가 있다.

RTGC는 직선으로 느리게 움직인다. 따라서 가능한 정지 상태에서 많은 작업을 하도록 유도하여야 하며, (그림 5)(a)에서와 같이 2개의 블록을 공유하는 경우도 일직선으로 이동하면서 작업하게 된다. 그러나 (그림 5)(b)와 같이 2개의 블록을 공유할 경우, RTGC는 B1 블록의 한쪽 끝까지 와서, 바퀴만을 90° 회전한 다음, 인근 B3 블록 오른쪽으로 이동, 블록내부로 진행한다. 그리고 다시 바퀴를 원상태로 90° 회전하여 B3 블록으로 진입하여 작업하게 된다. 이런 경우

RTGC의 이동시간이 많이 걸리게 되고, 이러한 시간들이 총 작업시간에 포함됨으로 작업의 효율성이 떨어지게 된다.



(a) RTGC의 B1, B2 블록 공유 작업



(b) RTGC의 B1, B2 블록 공유 작업
(그림 5) RTGC의 블록간 작업시 이동 흐름

3.2 컨테이너 터미널의 주요 운영 평가 요소

컨테이너 터미널의 작업은 다양한 운영 목적 하에서 이루어지는데, 터미널의 수행 능력을 평가하는데는 다음과 같이 세 가지 요소로 나눌 수 있다. 첫째는 선박의 턴-어라운드 시간이다. 즉, 선박이 부두에 접안하여 양적화하여 작업을 마치고 출항하는데 소요되는 평균시간을 말한다. 따라서 이 시간을 최소화하여야 한다.

둘째는 선박의 턴-어라운드 시간과 밀접한 관계가 있는 단위시간당 터미널의 처리량을 의미하는 QC의 작업률이다. 이 QC의 작업률은 최대화가 되어야 한다.

$$QC \text{ 작업비율} = \frac{\text{양적화 작업 컨테이너 수}}{\text{시간당 모든 QC 작업 컨테이너 수}} \quad (1)$$

셋째는 특정시간대에 터미널로 물리는 외부트럭에 의한 혼잡도이다. 이러한 운송로의 혼잡도가 결국은 컨테이너의 수송을 늦어지게 함으로써 터미널 작업에도 지장을 초래한다. 따라서 이러한 혼잡도를 최소화하여야 한다.

3.3 운송로의 혼잡도 측정

혼잡도는 쉽게 인식할 수 있는 개념이다. 그러나 이것을 최적화하기 위해서는, 터미널 운영에서 조정될 수 있는 결정 변수들에 의해 양적인 측정이 개발되어야만 한다. 여기에서는 Murty[11]가 연구한 혼잡도 측정을 적용한다. 즉, 게이트, 선석, 블록, 그리고 모든 교차로 등을 네트워크상의 노드로 표현한다. 도로가 양방향이라면, 각 방향은 각각 개별적인 도로 세그먼트로 간주한다. 그렇게 해서 각 도로 세그먼트는 오직 한 방향으로만 주행될 수 있으며, 그것에 관한 두 노드를 결합하고 있는 아크로 표현할 수 있다. 이것은 G에 의해 표시된 네트워크로서, 터미널 내부의 도로 시스템으로 표현된다.

도로 네트워크 G를 사용하고 있는 가장 일반적인 차량은 컨테이너를 수송하는 외부 트럭이다. G의 아크에 대한 흐름을 단위 시간당 아크를 통해 운행되고 있는 외부 트럭의 단위로 측정할 것이다. 따라서 f_k 를 나타내면 다음과 같다.

$$f_k = \text{flow}(\text{운행 트럭의 수} / \text{단위 시간}) \quad (2)$$

여기에서 $k=1, \dots, s$ 이며, s 는 G의 아크 수이다. 터미널에서 처리되는 컨테이너의 수가 증가함으로써, G의 아크상의 흐름도 증가하게 된다. 여기에서는 특정 아크들에 대해서 보다 전체 도로 네트워크인 G에서의 혼잡도 측정이 보다 더 중요하다. 만약 주어진 컨테이너의 처리량에 대해, 도로 세그먼트에 따른 흐름이 서로에 가능한 한 가까우면 우리는 최상의 교통 상황을 기대할 수 있다. 따라서 터미널 내부의 도로 시스템의 혼잡도 C는

$$C = \theta - \mu \quad (3)$$

$$\theta = \text{Max}(f_k : k=1, \dots, s), \quad \text{이다.}$$

$$\mu = \text{Min}(F_k : k=1, \dots, s)$$

3.4 최적화를 위한 기타 평가 요소

최적화를 위한 또 다른 평가 요소로는 다음과 같다.

- 수출 컨테이너를 야드에 장치하기 위해, 또는 수입 컨테이너를 반출해 나가기 위해 야드 장치장에서 외부트럭(TR)이 평균적으로 대기하는 시간을 최소화하는 것
- QC에서 양적화 작업으로, 또는 야드 장치장에서 RTGC의 작업으로 야드트랙터(YT)가 평균적으로 대기하는 시간을 최소화하는 것
- QC가 양적화 작업을 위해 YT를 기다리는 시간을 최소화하는 것

화하는 것

- 야드 장치장에서의 재조작의 횟수를 최소화하는 것
- 매일 사용되는 YT의 총 대수를 최소화하는 것

이러한 모든 운영 평가 요소들을 최적화하는 것은 좋은 자원 할당 결정을 필요로 한다. 즉, 선석 할당과 스케줄, 선박당 QC 할당, 컨테이너 장치공간, 블록당 RTGC의 배치, 각 QC당 YT 할당, 그리고 TR과 YT의 주행로 배정 등 게이트와 야드, 그리고 부두사이에서의 컨테이너 흐름이 효율적으로 이루어질 수 있도록 할당 결정이 필요하다.

3.5 일일 운영에 대한 의사 결정

컨테이너 터미널은 하루 8시간씩 3개조로 24시간 계속하여 운영되므로 터미널에서의 작업 계획은 조별로 8시간 단위로 세워진다. 따라서 의사 결정을 위한 계획의 범위도 8시간 단위로 세워야 하며, 일일 의사 결정을 위한 요소들도 다음과 같이 분류할 수 있다.

첫째는 도착 선박에 대한 선석 할당, 둘째는 접안 선박에 대한 QC 할당, 셋째는 YT에 대한 작업 배정, 넷째는 TR의 주행로 설정, 다섯째는 야드 장치장 배정, 여섯째는 RTGC 배정, 일곱째는 QC당 YT 배정, 여덟째는 TR의 반입 계획, 아홉째는 하역장비(QC, RTGC, YT 등)의 정비 등이다.

이러한 결정 요소들은 상호 관련성이 있으나 의사 결정을 위한 관련된 변수가 너무 많고, 불확실한 변수와 의사 결정의 복잡성 때문에 간단한 수학적 모델로 의사 결정을 위한 해를 얻기에는 불가능하다. 이 의사 결정 문제에 대한 합리적인 해답을 얻는 유일한 실질적인 방법은 계층적인 형태로 이들 요소들을 각각 별도로 연구하는 것이다. 이것은 Zhang과 Murty[12]의 연구에서 이 의사 결정 문제를 처리할 때에 개발되는 각 단계에 있어서 목적 함수를 대신하는 계층적 분해라고 불리는 기법을 발견했다.

최적의 의사결정시스템의 개발은 앞으로도 지속적으로 연구되어야 한다. 그러나 본 연구에서는 부산항에서 가장 관심을 가지고 있는 야드 장치장에서의 자원 할당과 관련된 의사결정으로서 앞의 아홉 가지 평가 요소들 중, 다섯 번째에서부터 일곱 번째까지를 의사결정시스템의 결정 자료로 정하는 전략을 세웠다.

3.6 야드에서의 장치 공간 할당

장치 공간 할당 결정을 위해서는 수출 컨테이너의 경우, 동일한 선박에 목적지가 같은 컨테이너끼리 선박내의 같은 배에 선적할 수 있도록, 그리고 수입 컨테이너의 경우, 같은 운송회사나 화주가 선박으로부터 양하되어 장치되어 있는 컨테이너를 재조작없이 반출해 나갈 수 있도록 그룹화한다. 이러한 결정을 위한 계획은 앞 절에서 언급하였듯

이 8시간 단위(각 교대조 업무가 시작될 때)로 수립하며, 이 결정 계획을 위한 모델에는 다음과 같은 입력 데이터가 필요하다.

- b = 선석 수
- n = 야드에서의 블록 수
- S_i = 블록 i에서의 컨테이너 장치 공간, $i = 1, \dots, n$
- R_i = 블록 i의 장치율 = (특정 시간대의 블록 i에 장치된 컨테이너 갯수)/ S_i , $i = 1, \dots, n$
- OS_{i1} = 양하작업을 위해 들어낼 블록 i에 장치된 수출 컨테이너 갯수, $i = 1, \dots, n$
- OS_{i^d} = RS에 장치된 컨테이너 중 선석 d로 운반해야 되는 컨테이너 갯수, $d = 1, \dots, b$
- IS_i = 블록 i에 장치된 컨테이너 중 특정시간에 화주에 의해 가지고 나갈 반출예정 수입 컨테이너 갯수, $i = 1, \dots, n$
- $IS = \sum_{i=1}^n IS_i$ = 특정 시간에 화주에 의해 반출되어질 수입 컨테이너의 총 갯수
- IM = 특정 기간동안의 양하 예정 수출 컨테이너 갯수
- IM^d = 선석 d에 접안된 선박으로부터 양하될 수입 컨테이너의 개수, $\sum_{d=1}^b IM^d = IM$
- EX = 특정 기간동안 야드 장치장으로 들어 올 수출 컨테이너의 갯수
- $EX_i, [IM_i]$ = 특정 시간에 터미널의 블록 i에 장치되는 수출[수입] 컨테이너의 총 개수, $i = 1, \dots, M$

$IM + EX$ 는 터미널 야드에 새로 도착하는 컨테이너들로서 각각 야드에 장치되기 위해 장치 공간이 할당되어야 한다. 이 할당 정책은 도로 네트워크상의 혼잡도와 재조작 횟수에 영향을 주므로 양쪽 모두다 최소화되어야만 한다. 다량의 컨테이너가 야드에 이미 장치되어 있는 상태에서 새로운 $IM + EM$ 의 컨테이너를 야드 공간에 할당하기 위한 결정은 블록 할당과 장치위치 할당으로 구분한다.

3.6.1 블록 할당

블록 할당은 Murty[11]가 연구한 방법을 대안으로, 그 가설은 다음과 같다.

가설 : 만일 모든 블록에 장치율이 거의 동일하게 유지된다면 터미널의 트래픽 정체가 최소화될 것이다. 즉, 트래픽 량은 터미널에서 모든 도로에 동일하게 분배되는 경향이 있을 것이기 때문이다. 이 가설을 적용하면 아주 간단하게 EX_i 와 IM_i 를 결정하게 된다($i = 1,$

\dots, M). 여기에서 특정 기간 t에 이 가설을 적용, 다음 시간인 t+1의 EX_i 와 IM_i 의 값을 계산한다.

$EX_i(t+1), IM_i(t+1)$: t+1 기간에 해당하는 결정 변수의 계산 값

EX, IM : t+1 기간동안의 이들 자료 항목의 값

$EX_i(t), IM_i(t)$: 현재 기간 t의 결정 변수의 값

F_i : 현재 기간 t의 시작시점에서의 블록i의 장치율

ES_i, IS_i : 현재 기간 t 동안 이들 자료 항목의 값

t+1 기간동안의 블록 할당의 처리는 다음과 같다.

단계 1 : 장치율 \bar{R} 를 계산한다.

$$\bar{R} = \frac{EX + IM + \sum_{i=1}^n (R_i S_i - ES_i - IS_i + EX_i(t) + IM_i(t))}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (4)$$

단계 2 : 현재 기간 t의 마지막에 장치율의 증가로 블록을 재배치한다. 현재 기간 t의 마지막 시점에서의 블록 i의 장치율은 다음과 같다.

$$\bar{R}_i = \frac{(R_i S_i - ES_i - IS_i + EX_i(t) + IM_i(t))}{S_i} \quad (5)$$

이 값이 증가되면 블록을 재배치하며, 재배치한 후 i값의 증가에 따라 장치율도 다시 증가하게 된다.

단계 3 : $EX_i(t+1)$ 의 값을 결정한다. 먼저 도착하는 수출 컨테이너를 고려하여, 도착하게 될 수출 컨테이너 모두를 i값을 1부터 n까지 증가시키면서 블록에 할당한다. 그리고 각 블록의 장치율을 구한다.

Set $\alpha = \alpha - EX$ initially

Do for $i = 1$ to n ; until $\alpha = 0$;

set $IM_i(t+1) = 0$

$$EX_i(t+1) = \max \{ \bar{R} S_i - (R_i S_i - ES_i - IS_i + EX_i(t) + IM_i(t)), 0 \} \quad (6)$$

$$\alpha = \alpha - EX_i(t+1)$$

α : 장치하기 위해 남아있는 수출 컨테이너의 개수

단계 4 : $IM_i(t+1)$ 의 값을 결정한다. 수입 컨테이너 모두를 i값이 p+1부터 n까지 증가시키면서 블록에 할당한다.

Set $\beta = IM$ initially

Do for $i = p+1$ to n ; until $\beta = 0$;

set $EX_i(t+1) = 0$

$$IM_i(t+1) = \max \{ \overline{RS}_i - (R_i S_i - ES_i - IS_i + EX_i(t) + IM_i(t)), 0 \} \quad (7)$$

$$\beta = \beta - IM_i(t+1)$$

β : 장치하기 위해 남아있는 수입 컨테이너의 개수

이것은 $EX_i(t+1)$, $IM_i(t+1)$ 를 결정하기 위해 광범위한 절차를 제공한다. 이 절차의 편리한 특징은 어느 한 기간 동안 장치를 위해 각 블록은 수출 컨테이너 또는 수입 컨테이너를 받는다는 것이다. 이것은 RTGC 가동의 효율을 늘리는 것을 도와준다. 상기의 절차가 단지 결정 변수 EX_i, IM_i ($i = 1, \dots, M$)의 값을 결정할 뿐이다. 그것은 장치 블록에 도착하는 각각의 컨테이너에 대해 장치위치를 지정하지 않으며, 다음의 온라인 절차에 의해 장치 블록만을 할당한다.

온라인 절차 : ① 수출 컨테이너 : 블록에는 특정 기간동안 EX_i 가 감소되면서 배열된다. 즉, 재배열 후에 i 값이 증가함으로써 EX_i 가 감소한다. 그리고 이 정보는 게이트로 전달된다. 수출 컨테이너가 특정 기간 동안 도착함으로써 게이트는 i 값을 1부터 n 까지 증가시키면서 첫 번째 블록부터 각각 할당한다. ② 수입 컨테이너 : EX_i 대신에 IM_i 를 사용하는 것을 제외하고 수출 컨테이너의 절차와 같다.

3.6.2 장치위치 할당

장치 블록에 도착하는 컨테이너를 순서대로 장치하는 것은 불가능하다. 따라서 컨테이너에 대한 장치위치 결정은 온라인 알고리즘을 적용하는 것이 적합하다. 그리고 이러한 장치위치 할당은 컨테이너의 재조작에 영향을 미친다. 그래서 이러한 할당은 재조작을 최소화하도록 이루어져야 한다.

장치공간이 있는 블록에 컨테이너 A가 스택에 장치될 경우 재조작 지수를 정의하면 다음과 같다.

- 0 : 컨테이너 A를 장치하고자 할 때 스택이 비어있는 경우
- γ : 컨테이너 A 도착전에 스택에 장치되어 있는 컨테이너의 수

재조작 지수는 컨테이너 A가 장치되어 있을 때 재조작되어지는 횟수를 말한다. 그러므로 블록에 컨테이너를 장치할 때는 발생하게 될 재조작을 최소화하여야만 되는 문제가 있다. 이 문제에 대해서도 주로 사용되는 최적 접근 방법으로서 우수한 결과를 나타내는 온라인 접근법을 적용한다.

온라인 절차 : 컨테이너가 도착하면, 모든 스택들 중에서 이 비 스택의 최대 단적수로 꼭 차 있는 스택을 제외하고, 재조작 지수가 가장 적은 빈 공간

이 있는 스택을 찾는다. 그리고 컨테이너를 그 스택의 최상단에 장치한다.

3.7 블록에서의 RTGC 배치의 최적화

RTGC 배치 문제에 대한 계획의 범위도 8시간 단위로 수립한다. 블록의 제한된 크기 때문에, 하나의 블록에 많아야 2대의 RTGC가 작업을 하게 된다. RTGC는 아주 느리게 움직이는데, 이러한 동작이 작업의 생산성 뿐만 아니라 블록간의 교통 흐름을 방해하는 요인도 된다. 이러한 것은 작업기간동안 언제든지 발생할 수 있기 때문에 터미널에서는 작업기간동안 RTGC의 블록간 이동을 한번정도로 제한해야 한다. 작업시간이 8시간이므로, 그 작업시간 동안 RTGC의 능력을 240RTGC 분으로 표현, 다음과 같이 나타낸다.

γ = RTGC가 컨테이너를 해당 스택의 맨 윗단적에 장치하거나 들어낼 때의 평균시간,

ρ = 재조작의 빈도로서, 하나의 컨테이너를 취급할 때 발생하는 재조작의 횟수

일정기간동안 블록에서 장치될 컨테이너의 개수와 들어낼 컨테이너의 개수가 주어진다면, 그 기간에 그 블록에서 RTGC 작업량을 RTGC분으로 측정하는 것이 가능하다. RTGC 배치 모델은 배치 결정에 이러한 작업량 데이터를 사용한다.

각 블록의 RTGC 작업량은 그 기간내에 마치는 것이 매우 중요하다. 만일 그렇지 않으면 TR의 과도한 대기시간과 선박 출항시간의 지연을 초래할 수도 있다. RTGC의 작업이 끝나지 않으면 다음 작업기간으로 넘어가게 되고, 다음 작업에서 우선 처리를 해야할 것이다. 여기에서 이처럼 종결되지 않은 RTGC의 작업을 지연된 RTGC의 작업량이라고 정의한다. RTGC의 배치는 이러한 지연된 RTGC의 작업량을 각 작업기간동안 최소화하는 것이다.

RTGC 배치 모델은 데이터 항목으로 γ, ρ 외에 다음 데이터들을 필요로 한다.

m = 야드의 블록 수

n = 야드에서 작업중인 RTGC의 댓수

γ_i = 블록 i 에서 앞 작업을 다 마치고 배치해 있는 RTGC의 댓수, $i = 1, \dots, m$

c_{ip} = RTGC가 블록 i 에서 블록 p 로 이동하기 위해 걸리는 시간(분); $i \neq p = i, \dots, m$. 만일 터미널이 RTGC를 블록 i 에서 p 로 이동하는 것을 원하지 않는다면 c_{ip} 를 ∞ 또는 아주 큰 값을 준다.

ES_i = 특정기간동안 선적될 블록 i 에 장치되어 있는 수출 컨테이너 개수, $i = 1, \dots, m$

IS_i = 특정기간동안 반출될 블록 i 에 장치되어 있는 수

입 컨테이너 개수, $i = 1, \dots, m$

$EX_i, [IM_i]$ = 특정기간동안 블록 i 에 장치되기 위해 터미널에 도착하는 수출입 컨테이너의 총 개수, $i = 1, \dots, m$

이 데이터들을 이용, 특정 기간동안 블록 i 에서 예상되는 RTGC의 작업량을 RTGC분으로 나타내면 다음과 같다.

$$w_i = (ES_i + IS_i)(1 + \rho)\gamma + (EX_i + IM_i)\gamma \quad (8)$$

그러나, RTGC 배치 문제가 어려운 것은 다음과 같은 사실 때문이다. RTGC의 모든 작업은 RTGC가 단독으로 수행하는 것이 아니라 TR과 YT들이 작업수행을 위해 RTGC가 있는 블록을 왕래하는 것과 밀접한 관련이 있다.

Murty[12]는 특정기간 동안의 RTGC 배치 문제를 CPLEX와 같은 상용 소프트웨어 패키지에 의해 아주 효율적으로 해를 얻을 수 있는 MIP(Mixed Integer Programming Problem)로서 총 지연되는 작업량을 최소화하도록 모델화하였으며, Zhang[14]은 24시간동안 적용될 수 있도록 MIP를 더 확대하여 효율적인 해를 구할 수 있도록 모델화하였다.

그러나 이 모든 모델들은 위에서 언급한 사실을 무시했다는 단점이 있고, 터미널에서 실제적으로 적용하기에 너무 수학적 방법에 의존하고 있으며, 보다 더 단순한 접근방법이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 만일 RTGC가 24시간 동안 적용된다면 처음에 배치된 블록에서 계속 머물러야만 하므로 특정기간의 시작시점에 있는 모든 RTGC를 다음과 같이 구분하여 접근하는 새로운 방법을 제시하고자 한다.

- 적격의 RTGC : 현재의 블록에서 특정기간동안 해당 작업을 완료하고 쉬고 있는 장비들
- 비적격의 RTGC : 현재의 블록에 이전의 작업이 남아있는 곳에 있는 장비들

여기에서 RTGC가 적격인지 비적격인지, 그리고 블록에서 작업량 w_i 를 비교하는 것은 단순한 문제가 아니므로 다음을 고려하여 판단한다.

- ① 만일 블록에 2대의 RTGC가 배치되어 있고, 작업 시작 시점이나 t 시간이 경과된 시점에서 그 블록에 도착 예정 트럭의 빈도가 낮으면 1대의 RTGC만으로 작업할 수 있다. 따라서 다른 1대는 이 블록에서 이동한다.
- ② 만일 도착 예정 트럭이 지금은 물론, t 시간 후에도 없다면 이 블록에 있는 모든 RTGC를 옮길 수 있다.
- ③ 보통의 폭 라인을 공유하는 인근 블록 사이에서는 RTGC가 쉽게 이동할 수 있다. 앞의 (그림 5)에서 (B1 B2)가 해당된다. 따라서 만일 이 두 블록에 TR의 예

상되는 도착 패턴이 나타난다면 이곳에 있는 RTGC($k (=1, 2, 3)$)는 이 두 블록 사이를 자유로이 다니면서 작업량을 처리한다.

크레인 운영자는 크레인이 작업기간동안 초기 블록에서 다른 곳으로 이동이 가능한지를 결정하기 위하여 위에 제시한 3가지 사항을 사용한다. 또한, $\gamma_j = 1$ 또는 0이라면 그 기간의 블록 j 는 sink 블록으로서 구분된다. 그리고 그것의 예상되는 작업량은 이 RTGC의 수용능력을 초과하는데, 그것이 지금 이 기간에 필요로 하는 RTGC의 추가가 예상되는 갯수 δ_j 이다.

- $\delta_j = 1$ 일때 $\gamma_j = 1$ 이면 어느 한 시점에 RTGC가 최대 2대가 되며,
- $\delta_j = 1$ or 2 일 때 $\gamma_j = 0$ 이면 그 블록의 작업량에 따라 결정한다.

p 가 적격한 RTGC의 대수(RTGC의 대수 = $1, \dots, p$)이고, q 가 sink 블록의 수(블록의 수 = $1, \dots, q$)일 때 결정변수 x_{ij} ($i = 1, \dots, p, j = 1, \dots, q$)는 다음과 같다.

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{RTGC가 블록 } i \text{에서 } j \text{로 이동} \\ 0, & \text{그외} \end{cases}$$

c_{ij} 는 RTGC가 블록 i 에서 j 로 이동할 때 걸리는 시간이려면 이처럼 이동에 의해 RTGC의 생산적인 시간을 잃게 되는데 이것은 $\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q c_{ij} x_{ij}$ 로 구할 수 있다.

이것은 총 지연되는 RTGC의 작업량을 위한 치환 목적 함수와 같다. 따라서 가까운 최적 조건으로서 보다 쉽게 계산된 Vogel Solution을 사용하는 전략이 바람직하다.

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q c_{ij} x_{ij} \quad (9)$$

$$\text{subject to } \begin{cases} \sum_{j=1}^q x_{ij} \leq 1, & i = 1, \dots, p, \\ \sum_{i=1}^p x_{ij} = \delta_j, & j = 1, \dots, q, \\ x_{ij} = 0 \text{ or } 1. \end{cases}$$

3.8 QC에 YT와 과업 할당의 최적화

QC가 선박으로부터 컨테이너를 양하할 때, 일정 수의 YTs가 QC에 할당된다. 이 YTs는 QC 아래에 일렬로 들어 오는데, QC가 양하 컨테이너를 선박으로부터 집어, 맨 앞의 YT에 실는다. 그러면 YTs는 야드에 장치하기 위해 해당 블록에 있는 RTGC에게 간다. RTGC가 YTs의 컨테이너를 집어 해당 스택의 맨 위에 장치하게 되고, YTs는 다

시 QC쪽으로 돌아온다. 이렇게 이런 일련의 과정이 작업시간동안 작업이 완료될 때까지 계속 되풀이 된다. 적하 컨테이너의 경우 역으로 YT가 장치 블록에서 QC쪽으로 수출 컨테이너를 실어 나른다. 여기에서 n_a 를 QC에 할당된 YT의 댓수라고 한다. 만일 n_a 가 너무 작으면, YT를 기다리고 있는 QC의 대기시간이 길어진다. 반대로 n_a 가 너무 크면, QC의 아래 대기선에 있는 YTs, 또는 장치 블록에 있는 YTs의 대기시간이 길어진다. 따라서 선박의 양적하작업과 관련된 QC의 대기시간과 YTs의 댓수에 대한 최적화를 위해 n_a 에 대한 최적값을 찾는 것이 필요하다. n_a 는 YTs가 QC와 장치 블록 사이를 오고가기 때문에 QC의 위치와 장치 블록의 위치에 상당한 관계가 있다. 이러한 결정을 위한 입력 데이터는 다음 무작위 변수의 가능성 분포이다.

x_a, y_a = YT의 QC와 장치 블록간의 왕복 시간

z_a = QC가 컨테이너 한 개를 처리하는 시간

w_a = 장치 블록에서 RTGC가 YT에게 서비스하는 시간

부두의 QC, 장치 블록의 RTGC, 그들 사이에서 운행하는 YTs는 대기행렬을 나타낸다. 이 대기행렬을 나타내는 네트워크의 수학적 분석은 모든 이 분포가 부정적인 지수 함수라는 가정 하에서 Tsang과 Wan[13]이 수행하였다. 그러나, 이 무작위 변수 위에서 하게 되는 관찰은 부정적인 지수 함수가 그 분포에 좋은 적합이 되지 못하고, 일반적인 분포를 보이고 있다. 수학적 기술에 의한 상태 가정 하에 대기행렬을 만들고 있는 네트워크의 분석은 매우 어렵다. 그래서 본 논문에서는 부두의 QC 위치와 장치 블록에 대한 결정 변수 n_a 의 최적 값을 시뮬레이션 실험을 통해 추정한다. 실험의 결과는 <표 1>과 <표 2>에 나타나 있다.

t_Q = QC의 대기시간, t_I = 모든 YT의 대기시간

cost = QC와 YT의 대기시간 비용(QC의 대기시간 1초 = 200unit, YT의 대기시간 1초 = 1unit라 가정)

처리시간 = 모든 컨테이너를 처리하는데 걸리는 시간

<표 1> 실험 1(컨테이너가 20개일 경우)

n_a	t_Q	t_I	비 용	처리시간(초)
1	5,562.76	0	1,112,552	7,961
2	1,679.81	122.37	336,085	4,091
3	463.88	454.71	93,230	2,862
4	149.31	1,925.11	31,787	2,547
5	147.25	4,135.00	33,586	2,540
6	147.78	6,254.97	35,811	2,547
7	149.69	8,424.59	38,364	2,547
8	144.57	10,476.80	39,391	2,548

<표 2> 실험 2(컨테이너가 40개일 경우)

n_a	t_Q	t_I	비 용	처리시간(초)
1	11,177.62	0	2,235,524	15,940
2	3,357.39	5.97	671,708	8,153
3	21.07	19.90	4,233	5,663
4	5.64	90.29	1,218	5,020
5	5.54	207.08	1,315	5,014
6	5.48	314.94	1,412	5,017
7	5.47	425.65	1,519	5,023
8	5.50	527.29	1,628	5,024

양쪽 실험에서는 $n_a = 4$ 일 때 QC에 할당받은 YTs가 모든 컨테이너 처리에 대해 비용과 처리시간에 있어서 최적을 보여주고 있다. 특히 실험에 적용된 컨테이너들은 각기 야드의 여러 곳에 산재되어 있고, 그 개수가 달라도 최적의 n_a 값에는 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 시뮬레이션을 사용한 이 방법은 YTs의 댓수뿐 아니라 예상되는 작업의 시간까지도 제공한다. 또한 할당된 YTs는 QC의 모든 과정을 전부 수행하여야만 된다. 이를 위해서는 QC와 YTs간에 대기시간이 발생할 수 밖에 없기 때문에 QC와 YTs의 작업대기시간의 최소화도 필요하다. 이를 위해 다음과 같은 알고리즘을 제안한다.

단계 1 : (초기화) - YT의 운행시간 등을 고려하지 않고 QC의 작업시간만을 가지고 과업을 수행할 YT를 구한다.

단계 2 : (과업의 수행 가능여부 검사) - 만약 모든 YTs에 대해서 과업수행여부가 가능하면 단계 4로 이동한다. 그렇지 않고 특정 대상 과업을 수행할 YT가 없다면 이들에 대해서 현재의 과업수행시간을 증가순으로 정렬한다. 다음으로 QC에서의 시간간격과 YT가 이들을 연속적으로 수행할 때 필요한 시간간격을 비교하여 YT의 할당이 가능한지 여부를 살펴본다. 만일 가능하다면 다음 과업을 대상에 넣고 단계 2의 처음으로 돌아간다. 가능한 할당이 존재하지 않으면 단계 3으로 간다.

단계 3 : (과업대기시간의 증가) - 수행이 불가능한 과업을 가능하게 해주는 최소의 대기시간을 구하고 동일한 QC에서 수행되는 모든 후속 과업들에 대해서도 대기시간을 구해진 최소값만큼 증가시킨 후 단계 2로 간다.

단계 4 : (과업할당) - 과업들간에 YT가 이동하는 시간을 구하여 총이동시간이 최소가 되도록 YT에 과업을 할당한다.

이상과 같은 방법을 통해 향후 터미널에서 YT를 도입할 때, 그 도입 댓수와 과업할당에 최적화를 기대할 수 있을 것이다.

4. 실험 및 평가

야드에서의 장치공간 할당과 블록에서의 RTGC 배치, 그리고 QC에 YT 할당은 궁극적으로 야드에서 접안된 선박에까지 컨테이너의 처리가 얼마나 잘 효율적으로 수행하였는지의 적절한 척도가 된다. 따라서 G2 언어를 사용하여 시뮬레이션에 의해 야드장치장 배정과 RTGC 배치, 그리고 QC당 YT 배정의 최적화를 이루기 전과 후의 선박작업 시간을 산출, 비교하여 다음과 같이 보다 효율적인 결과 값을 얻었다. 입력 값은 신선대부두의 2주간 도착선박자료 중 일부를 사용한 것으로 최적화 이전의 값이다.

<표 3> 검증을 위한 수행평가

항 목	입력 값	본 모델의 평균	비교 값
1번 라인	30.2 시간	27.9 시간	-0.08
2번 라인	16.4 시간	15.3 시간	-0.07
3번 라인	7.8 시간	7.8 시간	0.00
4번 라인	11.2 시간	11.3 시간	0.01

* 항목 : 도착선박, 입력 값 : 양적하 작업시간

<표 3>에서와 같이 선박 작업시간의 최소화를 위한 의사결정시스템을 적용할 경우 양적하 작업시간이 클수록, 즉 컨테이너 처리량이 많을수록 작업 시간이 단축됨을 알 수 있다. 요약하면 야드의 장치공간 할당이 해당 선박과의 거리에 영향을 미치며, QC에 YT 할당이 양적하 작업시간에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

컨테이너 터미널의 운용 효율을 보다 강화하려면 이러한 의사결정의 범위와 복잡성이 더해지게 되어 의사결정 도구의 필요성이 강조될 수 밖에 없다. 본 논문에서는 이러한 목적을 위해 수학적 모델과 알고리즘을 사용하여 가장 효율적인 의사결정시스템을 설계하는데 필요한 방법들을 제시하였다. 따라서 이들 의사 결정들에 대한 요소들을 상세히 기술하였고, 의사결정시스템 개발을 위한 설계 전략을 논의하고, 시뮬레이션에 의해 비교 평가하였다. 앞으로는 본 연구에서 제외한 QC의 양적하작업 계획과 컨테이너 터미널 내에서 운행하는 YTs 이외의 장비들에 대한 할당 문제가 연구되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] McDowell, E., Cho, D., Martin, G. and West, T., "A Study of Maritime Container Handling," Oregon State Univ., Sea Grant College Program Ads 403, Publication No. ORESU-T-85-003, 1985.

[2] Chung, Y. G., "An Animated Simulation Model for a Trans-stainer based Container Handling Facility," Master Thesis, Oregon State Univ., 1987.

[3] Taleb-Ibrahimi, M., "Modeling and Analysis of Container Storage in Ports," Ph.D. Thesis, Univ. of California at Berkeley, 1989.

[4] Watanabe, I., "Characteristics and Analysis Method of Efficiencies of Container Terminal - An Approach to the Optimal Loading/Unloading Method," Container Age, pp.36-47, March, 1991.

[5] Kim, K. H., "Analysis of Rehandles of Transfer Crane on a Container Yard," Proceedings of APORS '94, Edited by Masanori Fushimi, Kaoru Tone, World Scientific, 1995.

[6] Castilho, B. D., Daganzo, C. F., "Handling Strategies for Import Containers at Marine Terminals," Transp. Res. B, Vol. 27b, No.2, pp.151-166, 1993.

[7] 김갑환, 박영만, "무게를 고려한 수출 컨테이너의 장치위치 결정법", 대한산업공학회지, 제22권 제4호, pp.762-768, 1996.

[8] 박영만, 김갑환, "컨테이너 터미널의 시뮬레이션을 위한 의사결정시스템", CIIPM(Center for Intelligent & Integrated Port Management Systems), 연구결과발표논문집, 2000.

[9] 이종술, "계약만족기법을 이용한 컨테이너 터미널의 수출장 치장 공간할당 계획", 부산대학교 석사학위논문, 2000.

[10] 홍동희, 정태충, "자동화항만의 야드운영시스템 레이아웃 설계", 정보처리학회논문지D, 제10-D권 제1호 pp.101-108, 2003.

[11] Katta G. Murty, "Storage Yard Planning in Container Shipping Terminals," Technical Report, Dept. of IEEM, Hong Kong University of Science and Technology, 1997.

[12] Chuqian Zhang, "Resource Planning in Container Storage Yard," Ph.D. thesis, Dept. of IEEM, Hong Kong University of Science and Technology, 2000.

[13] Tsang and Yat-Wah W. Wan, "A Newsboy Type Model for Scheduling Stevedoring Tractors At Container Terminals in Hong Kong," Technical Report, Dept. of IEEM, Hong Kong University of Science and Technology, 1996.

[14] Chuqian Zhang, Yat-Wah W. Wan, Jiyin Liu and Richard Linn, "Dynamic Crane Deployment in Container Storage Yards," Technical Report, Dept. of IEEM, Hong Kong Univ. of Science and Technology, 2000.



홍 동 희

e-mail : sonbal2000@dreamwiz.com

1981년 홍익대학교 전자계산학과(학사)

1987년 연세대학교 산업대학원 전자계산
전공(공학석사)

1999년 경희대학교 대학원 전자계산공학과
(공학박사 수료)

1987년~1999년 한국해양수산개발원 정보시스템연구실
책임연구원

2000년~현재 동원대학 e-비즈니스과 겸임 조교수

관심분야 : planning, 물류정보시스템, 시스템설계 방법론 등



정 태 충

e-mail : tcchung@khu.ac.kr

1980년 서울대학교 전자공학과(학사)

1982년 한국 과학 기술원 전자공학전공
(공학석사)

1987년 한국 과학 기술원 전자공학전공
(공학박사)

1987년~1988년 KIST 시스템 공학센터 선임연구원

1988년~현재 경희대학교 컴퓨터공학과 교수

관심분야 : 인공지능 등