

# 공컨테이너 운영 관리를 위한 모형 개발

하 원 익\* · 남 기 찬\*\*

Models for the Empty Container Repositioning and Leasing

*W. I. Ha\* · K. C. Nam\*\**

Abstract	4. 모형 수립
1. 서론	5. 방법론 개발
2. 의사결정과정의 이론적 고찰	7. 결론 및 향후 연구 과제
3. 선행 연구 조사	참고문헌

## Abstract

This paper is concerned with the development of a tractable model to assist liner shipping companies in the decision-making of empty container repositioning and leasing. A hybrid methodology is presented which properly accounts for the specific characteristics of empty container management. For this mathematical models are developed based on dynamic network models, covering both land and marine segment. Then a stochastic method is presented to deal with the uncertainty of the future demand and supply. Especially, the concept of opportunity cost has been introduced in order to explain interactions between the variation of the future demand and supply and the stock level at each depot.

### 1. 서론

컨테이너 선사가 공컨테이너 운영 관리와 관련하여 직면하는 의사결정문제는 지역간 공컨테이너의 수요와 공급의 불균형으로 인해 발생하는 잉여 공컨테이너를 재배치하는 것과 수송 수요를 만족

시키기 위해 필요한 시기에 공컨테이너를 이용할 수 없을 때 임대하는 것을 전략적으로 계획하는 것이다. 이러한 공컨테이너 재배치 및 임대와 관련된 의사결정은 공컨테이너의 이동 범위가 해상 운송인의 고유 운송구간인 해상을 넘어서 육상까지 확대되고, 운영과 관련된 조직이 다양하기 때문에 아

\* 한국해양대학교 대학원, 물류시스템공학과

\*\* 한국해양대학교 물류시스템공학과 부교수

주 복잡한 성격을 띠고 있다.

지금까지 수행된 연구들은 트럭이나 철도 등 내륙 배송시스템 내에서의 할당이나 라우팅 문제에 관련된 것이 많은 반면, 해상운송부문에서 공컨테이너 재배치 및 임대와 관련하여 수행된 연구는 많지 않다. 또한 대부분의 선행 연구들은 공컨테이너 운영 관리에서 중요한 동적특성이나 수요와 공급의 불확실성 등을 고려하지 않았고, 분석대상을 내륙 또는 해상 구간으로 제한하였기 때문에 컨테이너 선사에서 실용적으로 사용하기에는 많은 한계를 내포하고 있다.

본 논문은 공컨테이너 재배치 및 임대와 관련하여 컨테이너 선사의 독특한 공컨테이너 운영 관리 특성을 적절히 반영할 수 있는 실용적인 모형을 개발하는 것을 목적으로 동적특성과 배송시스템의 특성을 반영할 수 있는 수리모형을 개발하고, 현실적인 제약하에서 수요와 공급의 불확실성을 반영할 수 있는 방법론을 제안한다.

본 논문의 구성은 제2장에서는 공컨테이너 운영 관리와 관련하여 컨테이너 선사가 직면하는 의사결정문제들에 대해 고찰하고, 제3장에서는 지금까지 수행된 선행연구들에 대해 조사한다. 제4장에서 공컨테이너 운영관리의 동적특성을 적절히 나타내면서 내륙과 해상 배송시스템을 하나로 통합할 수 있는 수리모형을 제시한다. 제5장에서 장래 불확실한 수요와 공급의 영향을 적절히 반영할 수 있는

방법론을 제안하고, 제6장에서 적용과 관련된 고려사항을 살펴본다. 마지막으로 제7장에서 결론 및 향후 연구 과제에 대해 언급한다.

## 2. 의사결정과정의 이론적 고찰

이 장에서는 컨테이너 선사의 공컨테이너 배송시스템에서 발생하는 여러 가지 의사결정문제를 종합적으로 살펴본 뒤 공컨테이너 재배치 및 임대와 관련된 의사결정문제에 대해 고찰한다.

공컨테이너 운영관리는 선사가 운영하고 있는 화물 운송 및 배송시스템과는 불가분의 관계가 있다. 이러한 사실은 선사가 화물을 컨테이너에 적입하여 운송을 하면 자동적으로 공컨테이너 이동이 발생한다는 사실에서 쉽게 이해될 수 있다. <표 1>은 선사의 컨테이너 운송과 관련된 물류 의사결정사항들을 계획 단계별 배송시스템 별로 분류하여 네트워크의 세 가지 구성요소에 대해 나타내고 있다. 이러한 분류는 해상과 내륙 배송시스템으로 구성되어 있는 선사의 운송 및 배송 네트워크 특성과 운영 방식을 명확하게 이해하는데 도움이 되고, 개별 계획단계의 의사결정들 사이의 상호종속성(interdependence) 뿐만 아니라 해상과 내륙 배송시스템 사이에 존재하는 상호종속성을 확인할 수 있게 한다. <표 1>에서 분류한 의사결정문제들은 분석에 필요한 자료가 다르고 계획이나 실행에 관

<표 1> 계획 단계별 의사결정 분류

네트워크	의사결정	전 략	전 술	운 영
내륙배송 시스템	내륙데포		- 데포 수 - 데포 위치 - 데포 서비스지역할당	
	내륙운송		- 운송인 선정	- 라우팅 - 스케줄링
	컨테이너 재 고	- 컨테이너 적정 보유량	- 균형물동량	- 컨테이너 재배치 및 임대
해상배송 시스템	해상운송	- 투입 선박 수 - 투입 선복량	- 운항일정	
	항 만	- 기항 항만	- 항만 서비스지역할당	

런된 사람이나 조직이 다양하기 때문에 한 모형에 의해서 해결될 수는 없지만, 의사결정문제들 사이에 존재하는 상호 관계를 적절히 고려함으로써 전체 시스템의 운영 효율성을 제고할 수 있다.

한편, 그림 1.은 해상 컨테이너 운송 및 배송시스템의 특성을 설명하고 있다. 그림에서 보는 것처럼 선사들의 컨테이너 배송시스템은 항만을 매개로 해상과 내륙 배송시스템이 연결되어 운영되고 있다. 즉, 한 지역에서 발생한 컨테이너가 다른 지역으로 이동하기 위해서는 대부분 항만을 매개로 한 해상 배송시스템을 경유하게 된다. 이러한 해상 컨테이너 운송 및 배송시스템의 운영 특성상 내륙 배송시스템은 해상 배송시스템에 종속적이 된다.

지금까지 살펴본 바와 같이, 해상 컨테이너 운송은 각 계획단계의 의사결정들이 계층적 상호종속성을 지니고 있고 특히, 운영 특성이 상이한 해상과 내륙 배송시스템이 하나의 네트워크로 연결되어 운영되고 있어 관련 조직이 다양하고 의사결정 과정이 복잡하다. 이러한 복잡한 의사결정문제를 효과적으로 해결하기 위해서는 해상 컨테이너 운송 및 배송시스템의 특성을 적절히 반영하여 의사결정요소를 도출하고, 의사결정과정에서의 계층 구조를 반영하는 통합된 다단계 방법론을 생각할 수 있다.

그림 2.는 공컨테이너 운영 관리를 위한 통합 다

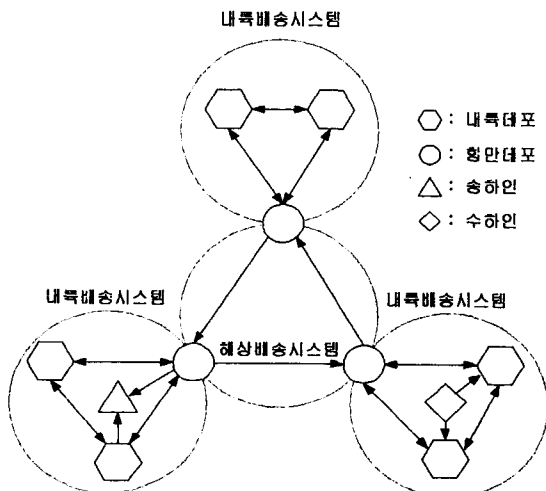


그림 1. 공컨테이너 배송시스템

단계 방법론의 개념도를 보여주고 있다. 최상위 단계는 장기 수요 예측에 근거한 전략적 장기 운영 계획에 관한 것으로 컨테이너 선박의 척수, 배선 간격, 컨테이너 육상 체류 일수 등을 고려한 수리 모형에 의하여 컨테이너 적정 보유량을 결정하는 단계이다. 다음은 전술적 운영 계획 단계로, 지역 또는 데포간 균형 물동량에 대한 제약을 갖는 배송 문제로 요약할 수 있다. 이 단계에서 컨테이너 운영 관리를 위한 네트워크 구성을 결정하게 된다. 즉, 항만 서비스 지역 할당, 선박 운항 일정, 사용 데포, 데포 서비스 지역 할당, 데포간 균형 물동량을 결정한다. 이러한 균형 물동량은 중기 수요 및 공급 예측과 항만 및 내륙데포의 서비스 지역 할당을 기초로 결정한다. 마지막 단계는 할당모형을 이용하여 실제 재배치 및 임대 계획을 수립하는 운영 계획 단계에 해당한다. 이 단계에서 선적예약 (booking prospect)이나 재고 현황 그리고 단기 수요 및 공급 예측 등을 바탕으로 재배치 계획을 수립하고 실행하며, 필요에 따라서는 단기 수요를 만족하기 위한 임대계획도 포함한다. 이 단계에서 사용하는 할당모형은 공컨테이너 운영관리의 동적특성과 불확실성을 적절히 고려할 수 있어야 한다.

지금까지 살펴본 바와 같이, 공컨테이너 운영관리의 의사결정요소는 장래 수요와 공급의 정확한 예측 또는 예상, 데포의 적정 재고수준 결정 그리고 공컨테이너 재배치 및 임대계획의 수립으로 요약할 수 있다. 이러한 의사결정요소들은 모든 계획단계

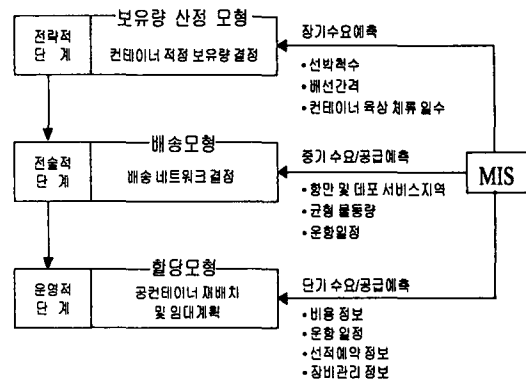


그림 2. 전체 의사결정과정

의 의사결정들과 관련이 있지만 특히, 전술적 단계의 계획은 실제 공컨테이너 운영 및 관리 업무에 직접적으로 영향을 미치는 의사결정으로 운영계획을 제약하게 된다. 즉, 공컨테이너 운영에 대한 의사결정문제는 장래 수요와 공급의 불확실성을 고려하여 데포의 적정 재고 수준을 결정하고, 공컨테이너 배송시스템의 특성과 동적 특성을 적절히 반영하여 필요한 재고 수준을 유지하기 위한 공컨테이너 재배치 및 임대 계획을 수립하는 것이다.

### 3. 선행 연구 조사

해상 컨테이너 운송 분야에서 공컨테이너 관리를 대상으로 한 연구들은 크게 컨테이너 정기선사가 보유해야 하는 컨테이너 적정 보유량 산정에 관한 전략적 측면의 연구(福田幹也, 1978), 공컨테이너 수급 불균형 문제를 다루는 전술적 측면의 연구(Lai et al., 1995; 박진수, 1990), 그리고 공컨테이너 재배치 및 임대를 위한 운영적 측면의 연구(Florez, 1986)로 나누어 볼 수 있다. 한편, 본 연구 대상인 공컨테이너 운영관리와 유사한 배송문제나 할당문제에 관한 연구는 내륙 화물운송 분야에서는 활발히 수행되어왔지만 해상운송 분야에 있어서는 미흡한 실정이다. 이 장에서는 먼저, 내륙 화물운송 분야에서의 장비나 차량의 배송과 할당문제에 대해 살펴보고, 본 논문의 주제인 공컨테이너

재배치 및 임대에 대한 선행연구들을 조사하여 비교한다.

철도 분야에서는 공컨테이너 관리 문제와 관련된 여러 연구가 활발하게 수행되어 왔다. Cuimet (1972)은 공차 배선문제를 위한 선형 계획 다단계 모형을 개발했으며, Jordan(1982)은 수요, 공급, 그리고 열차 스케줄의 불확실성 영향을 도입함으로써 기대이익을 극대화하는 비선형 확률모형을 개발하여 Cuimet의 방법을 발전시켰다.

그리고, French(1983)는 화물 차량 배송 관리에서 이용 가능한 7개의 네트워크 최적화 모형에 대한 특성을 비교하였다. <표 2>는 이러한 모형들의 주요 특성을 비교한 것이다. 전통적인 선형계획모형과는 달리 이러한 대부분의 모형들은 수요를 반드시 충족시키지 않고 최적화 절차를 수행한다. 이것은 철도 차량 배송 뿐만 아니라 컨테이너 재배치에 있어서도 중요한 요인이다. 왜냐하면 특정 상황 하에서는 모든 수요를 만족하는 것이 반드시 가장 높은 이익을 창출하는 것만은 아니기 때문이다. 한편, 이러한 모형들 중 일부는 이용 가능한 공급량이 수요량보다 적을 때는 수요 지역에 따라 우선순위를 부과할 수 있도록 하였는데 이러한 특성은 모형의 목적이 이익을 최대화할 때보다 비용을 최소화할 때 매우 중요하다. 특히, 이러한 모형에서는 시간이 아주 중요한 요인으로 작용하기 때문에 시간의 경과에 따른 수요와 공급의 변화를 적절히

<표 2> 네트워크 최적화 모형 조사

Model Features	Standard LP	Ford Co. Model	General Motors Model	Glickman /AAR Model	DSAI, Inc. Model	Mendiratta Model	Turnquist /Jordan Model
Imbalance between supply and demand	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Priorities	No	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes
Multi periodicity	No	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes
Uncertainty	No	No	Yes	No	No	Yes	Yes

\* Jordan, The Impact of Uncertain Demand and Supply on Empty Rail Car Distribution, Ph. D. dissertation, Cornell University, Ithaca, NY. 1982.

설명할 수 있어야 한다. 한편, 불확실성을 다루는 모형들은 훨씬 복잡하고 계산량이 많아지기 때문에 고려하는 물리적 네트워크 규모를 제한하기도 하고 최적해를 보장하지도 않는다.

Crainic et al.(1993)은 내륙 배송시스템에서 배송 문제와 관련된 동적특성과 수요와 공급의 불확실성을 고려하여 공컨테이너 할당을 위한 2 단계 순환모형(the two-stage restricted recourse model)을 제안하였다. 1 단계 문제에서는 모든 확률변수를 확정적이라고 가정하고 첫 번째 기간의 데포간 이동량을 계산하였으며, 2 단계 문제에서는 두 번째 기간에서 계획종료기간까지 데포의 재고변화를 추적하는 단순한 컨테이너 재고모형을 수립하였다. 이 연구는 모형수립에 초점을 두었으며 제안된 모형의 실제 해를 구하는 기법은 소개하지 않았다.

한편, 해상 컨테이너 운송 분야에서 공컨테이너 재배치 및 임대와 관련된 연구들을 살펴보면, Gao(1993)는 공컨테이너 재배치가 효율적으로 수행될 경우 컨테이너 정기 선사가 보유해야 하는 공컨테이너 적정 보유량을 줄일 수 있다는 점에 착안하여 임대 컨테이너를 줄임으로써 자본비와 운영비를 최소화하는 방안을 제시하였다. 이 연구에서는 먼저 선박이 기항하는 항구의 항차별 공컨테이너의 과부족을 추정한 뒤 이러한 결과를 바탕으로 공컨테이너를 재배치하는 비용최소화 모형을 개발하였다. 그러나 이 모형은 일부 제약이나 가정들이 지나치게 비현실적이어서 실용적인 모형으로서는 한계가 있다.

Florez(1986)는 다중 수송 수단을 이용하는 컨테이너 재배치 문제가 철도 차량 배송 문제와 많은 공통점이 있다는 사실에 착안하여 철도 분야의 연구를 바탕으로 해상운송분야에서 공컨테이너 재배치와 임대를 최적화하기 위한 동적환적 네트워크 모형을 개발하였다. 이 연구에서는 동적환적 네트워크(the dynamic transshipment network model)에 선형계획 알고리즘을 적용하기 위하여 공컨테이너 배송과 관련된 모든 직간접 비용과 재배치함으로써 얻어질 수 있는 수익을 고려하여 모든 아크에 대한 이익을 결정하였다. 이 모형은 동적환적

네트워크 구축을 위한 자료 수집에 많은 노력이 들고, 모든 아크와 관련된 직간접 비용과 수익은 선형화 기법(linearization techniques)을 적용하여 단위 아크의 이익을 구하였기 때문에 실제 컨테이너를 운송하여 얻을 수 있는 이익과는 차이가 있다. 또한 이 연구는 공컨테이너의 수요와 공급의 불확실성을 고려하지 않았으며, 단순히 해상구간만을 고려하였고 내륙구간은 고려하지 않았다.

Lai et al.(1995)은 유럽-중동-극동 항로에 취향하고 있는 홍콩의 한 컨테이너 정기선사의 공컨테이너 운영업무를 지원하기 위한 연구를 수행했다. 이 연구는 공컨테이너가 남아도는 중동지역에서 공컨테이너가 부족한 극동지역에 위치한 항만까지 공컨테이너를 이동시키는 문제에 국한하여 최저의 비용으로 공컨테이너를 할당하는 최적의 대안을 찾기 위한 시뮬레이션 모형을 개발하였다. 이 모형은 컨테이너 관리자가 직면하게 되는 세 가지 대안 즉, 중동 지역에서 공컨테이너를 재배치하는 경우, 임대회사로 컨테이너를 반환하는 경우, 그리고 새로 공컨테이너를 임대하는 경우의 여러 가지 대안들에 대해 공컨테이너 재배치, 임대 컨테이너 반환 제약, 임대 불확실성, 그리고 예상 수요의 편차와 같은 네 가지 운영 제약 하에서 관련 비용을 최소화하는 최적의 대안을 찾기 위해 2단계 휴리스틱 탐색기법(a two-step heuristic search approach)을 개발하여 최적의 대안을 구했다. 시뮬레이션 수행 결과, 대상업체의 경우 연간 약 US \$320,000의 비용절감을 거둘 수 있는 것으로 나타났다. 주목할 점은 이러한 비용절감이 공컨테이너 할당에 의해서만 얻어지는 것이 아니라 장래 수요에 대비하여 적절한 수준의 안전재고를 확보함으로써 얻어졌다는 것이다. 이 연구는 장기적인 측면에서 해운회사의 컨테이너 운영을 개선할 수 있는 유용한 방법으로 여러 가지 컨테이너 관리 정책에 대한 비용의 영향을 파악하는데 도움을 줄 수 있었다. 그러나, 이 모형은 항만들 사이의 수요나 공급의 패턴이 바뀔 경우는 적합하지 않고, 공컨테이너 관리의 동적특성을 고려하지 않았으며, 매일 매일의 운영계획을 위한 모형으로는 적합하지 않다.

#### 4. 모형 수립

선사의 컨테이너 관리담당자는 특정 기간의 공컨테이너 수요를 만족시키기 위해서 공컨테이너가 남아도는 지역에서 부족한 지역으로의 재배치, 미래의 수요에 대비한 보관, 부족한 지역에서 수요를 충족하기 위한 추가 임대 등과 같은 의사결정문제에 직면하게 된다. 이 장에서는 선사의 공컨테이너 운영관리에서 발생하는 동적특성과 배송시스템의 특성을 반영하여 담당자의 재배치 및 임대 의사결정을 지원하기 위한 최적화 모형을 수립한다. 먼저, 모형 수립시 사용하는 기호를 정의하면 다음과 같다.

- $T$  : 계획 기간의 길이;  $t = 1, 2, \dots, T$
- $D$  : 내륙 데포의 집합
- $P$  : 항만 데포의 집합
- $X_j^t$  : 기간  $t$ 에 데포  $j$ 의 공컨테이너 수요량;  
 $j \in DUP, t = 1, 2, \dots, T$
- $Y_j^t$  : 기간  $t$ 에 데포  $j$ 의 공컨테이너 공급량;  
 $j \in DUP, t = 1, 2, \dots, T$
- $U_j^t$  : 파손이나 손실 등으로 기간  $t$ 에 데포  $j$ 에서 사용할 수 없는 공컨테이너 수량;  
 $j \in DUP, t = 1, 2, \dots, T$
- $V_j^t$  : 신규 구입 또는 수리 완료 후, 기간  $t$ 에 데포  $k$ 에서 사용할 수 있는 공컨테이너 수량;  
 $j \in DUP, t = 1, 2, \dots, T$
- $Z_j^t$  : 계획 범위 시작 전에 데포  $j$ 로 보내져서 기간  $t$ 에 도착하는 공컨테이너의 수량;  
 $j \in DUP, t = 1, 2, \dots, T$
- $c_{jk}^t$  : 기간  $t$ 에 데포  $j$ 에서 데포  $k$ 까지 운송하는 단위운송비용;  
 $j \in DUP, k \in DUP, t = 1, 2, \dots, T$
- $c_j^t$  : 기간  $t$ 에 데포  $j$ 에서 컨테이너를 보관하기 위한 단위보관비용;  $j \in DUP, t = 1, 2, \dots, T$
- $\bar{c}_j^t$  : 기간  $t$ 에 데포  $j$ 에서 컨테이너를 임대하는 단위임대요금;

$$j \in DUP, t = 1, 2, \dots, T$$

$\underline{c}_j^t$  : 기간  $t$ 에 데포  $j$ 에서 컨테이너를 임대하는 고정임대비용(On-hire & off-hire cost);

$$j \in DUP, t = 1, 2, \dots, T$$

$\bar{c}_j^t$  : 기간  $t$ 에 항구  $j$ 에서 공컨테이너 임대여부를 결정짓기 위한 단위 페널티;

$$j \in DUP, t = 1, 2, \dots, T$$

#### 4.1 결정변수

최적화 모형의 결정변수는 공컨테이너 재배치량, 임대량, 재고량, 그리고 특정 기간의 특정 데포의 수요를 충족하지 못한 수요량이 된다. 이때 재배치량과 임대량은 시간과 공간에 대한 제약을 갖기 때문에 시간적·공간적으로 명확히 표기해야 한다. 데포간 컨테이너 이동에 소요되는 운송시간을  $\tau_{ji}$ 라고 하면, 공급데포에서 공컨테이너가 이동하는 시점이 정해지면 목적지에 도착하는 시점은 자동적으로 결정된다. 즉, 목적지의 도착기간은 공급데포에서의 출발기간에 목적지까지의 운송시간을 합하면 된다. 한편, 본 논문에서 두 데포간 운송시간에는 출발데포에서의 선적, 도착데포에서의 양하 그리고 두 데포 사이의 이동에 필요한 시간을 포함한다. 그러면, 최적화 모형에서 사용하는 결정변수들은 다음과 같이 표기할 수 있다.

- $v_{ji}^t$  : 기간  $t$ 에 데포  $j$ 에서 데포  $i$ 로 재배치한 공컨테이너 수량, 공컨테이너는 기간  $t$  ( $t + \tau_{ji}$ )에 도착한다;  
 $j \in DUP, k \in DUP, t = 1, 2, \dots, T$
- $w_j^t$  : 기간  $t$ 의 끝에 데포  $j$ 에 남아있는 공컨테이너 재고량;  $j \in DUP, t = 1, 2, \dots, T$
- $b_{ji}^t$  : 기간  $t$ 의 데포  $i$ 의 수요를 만족하기 위해 기간  $t$ 에 데포  $j$ 에서 단기 임대한 컨테이너 수량;  
 $j \in DUP, k \in DUP, t = 1, 2, \dots, T$
- $\delta_j^t$  : 기간  $t$ 에 데포  $j$ 에서 만족하지 못한 공컨테이너의 수요;  $j \in DUP, t = 1, 2, \dots, T$

한편, 항만을 중심으로 한 해상과 내륙 배송시스템 사이의 공컨테이너 이동은 해당 항만의 선박운항일정에 종속적이기 때문에 이러한 이동을 나타내기 위해서는 해당 항만의 선박 출항 날짜를 고려하여야 한다. 따라서 다음과 같은 기호를 정의할 필요가 있다.

$O_j$  : 항만 데포  $j$ 의 출항 시간 집합,  $j \in P$

내륙데포의 경우도 목적지까지 공컨테이너를 운송하는데 해상 배송시스템을 경유해야 할 경우에는 선박운항일정을 고려하여야 한다. 본 논문에서는 해상 운송구간을 경유하지 않고 공컨테이너를 운송할 수 있는 데포 집합을 나타내기 위해 항만 및 내륙 데포 집합에 대해 다음과 같은 기호들을 추가한다.

$AD_j$  : 데포  $j$ 의 인접 데포 집합;

$$j \in D \cup P, AD_j \subset D \cup P$$

$AP_j$  : 데포  $j$ 의 인접 항만 데포;

$$j \in D \cup P, AP_j \in P$$

즉, 이와 같은 동일한 인접데포 집합에 속하는 데포들 사이의 공컨테이너 이동은 선박운항일정과 무관하다. 그러나 인접 데포집합에 속하지 않는 데포들 사이의 공컨테이너 이동에서 출발시간은 출발데포의 인접 항만데포의 선박운항일정에 종속적이다. 따라서 본 논문에서는 이러한 제약을 나타내기 위해 추가로 다음과 같은 기호를 정의한다.

$DD'_i$  : 시간  $t'$ 에 데포  $i$ 의 수요를 만족하기 위해 시간  $t$ 에 데포  $j$ 에서 출발하여 시간  $t + \tau_{ji}$ 에 공컨테이너가 도착하는 모든 데포  $i$ 의 집합.

$$\begin{aligned} j \in D \text{인 경우} \\ i \in AD_j &\rightarrow t + \tau_{ji} \leq t' \\ i \notin AD_j &\rightarrow t + \tau_{jk} + \tau_{ki} \leq t' \mid t + \tau_{jk} \in O_k \\ j \in P \text{인 경우} \\ i \in AD_j &\rightarrow t + \tau_{ji} \leq t' \\ i \notin AD_j &\rightarrow t + \tau_{ji} \leq t' \mid t \in O_j \end{aligned}$$

이면, 데포  $i$ 는  $DD'_i$ 에 속한다.

$j \in D \cup P, t = 1, 2, \dots, T$ ; 단,  $k \in AP_j$ ;

$SD'_i$  : 시간  $t$ 의 데포  $i$ 의 수요를 만족하기 위해 컨테이너를 공급하는 모든 데포  $j$ 의 집합으로 시간  $t$ 에 데포  $j$ 를 출발하여 시간  $t + \tau_{ji}$ 에 데포  $i$ 에 도착한다.

$$\begin{aligned} i \in D \text{인 경우} \\ j \in AD_i &\rightarrow t + \tau_{ji} \leq t \\ j \notin AD_i &\rightarrow t + \tau_{jk} + \tau_{ki} \leq t \mid t + \tau_{jk} \in O_k \\ i \in P \text{인 경우} \\ j \in AD_i &\rightarrow t + \tau_{ji} \leq t \\ j \notin AD_i, j \in D &\rightarrow t + \tau_{jk} + \tau_{ki} \leq t \mid t + \tau_{jk} \in O_k \\ j \notin AD_i, j \in P &\rightarrow t + \tau_{ji} \leq t \mid t \in O_j \end{aligned}$$

이면, 데포  $j$ 는  $SD'_i$ 에 속한다.

$i \in D \cup P, t = 1, 2, \dots, T$ ; 단,  $k \in AP_j$ ;

데포  $j$ 의 인접 항만데포  $AP_j$ 를 구할 때 데포  $j$ 가  $j \in P$ 이면,  $AP_j$ 는  $j$  자신이 된다.

#### 4.2 제약식

최적화 모형의 제약식은 계획기간 동안 모든 데포에서 공컨테이너의 유입과 유출이 같아야 한다는 재고 균형방정식과 두 데포간 공컨테이너 이동 용량, 데포의 저장용량, 그리고 임대가능량에 대한 상한으로 나타난다.

##### ① 재고 균형방정식

각 데포에서 공컨테이너의 재고는 각 기간의 종료 시점에 계산된다. 각 기간의 데포에서 공컨테이너 재고는 해당 기간의 초기에 이용 가능한 재고와 각 기간 동안의 공컨테이너 유입량에서 공컨테이너 유출량을 뺀 것이 된다. 각 기간의 유입은 공급량, 임대량, 이전 기간에 다른 항만 및 내륙데포에서 재배치 계획에 의해 이동하여 현 기간에 해당 데포에 도착하는 공컨테이너 수량, 외부로부터 공급되는 컨테이너 등이고, 유출은 해당 기간의 수요량과 재배치량, 그리고 수리나 임대 계약 완료로 시스템 외부로 나가는 수량이 된다. 계획기간 초기에 데포  $j$ 에서 이용 가능한 초기재고를  $w_j^0$ 라 하면, 각 기

간의 종료시점의 모든 데포의 재고는 다음과 같다.

$$w_k^t = w_k^{(t-1)} + \sum_{t' \leq t} \sum_{j \in SD_k^t} \sum_{\tau_{jk} = t-t'} v_{jk}^{t'} + \sum_{i \in DD_k^t} b_{ki}^t - \sum_{i \in DD_k^t} v_{ki}^t + Z_k^t - U_k^t + V_k^t - X_k^t + Y_k^t + \delta_k^t \dots \dots \dots \text{식(1)}$$

for all  $k \in D \cup P, t = 1, 2, \dots, T$

재고 균형방정식은 데포에서 공컨테이너 수요를 충족하지 못하는 수요를 여유변수로 나타내고 수요를 만족하지 않았을 경우의 손실비용을 설명하고 있다. 이 여유변수는 새로운 컨테이너를 단기 임대하는 비용과 수요를 만족하였을 경우 얻어지는 이익 사이의 트레이드오프(trade-off)에 대한 분석을 가능하게 해준다.

② 이동용량 제약

이동용량제약 방정식은 해당 운송구간에서 공컨테이너를 이동할 수 있는 용량에 대한 상한이다. 해상 배송시스템의 경우 이러한 제약은 자사선이나 동맹선사 선박의 여유적재공간에 의해 결정되고, 내륙 배송시스템의 경우 선사와 내륙 운송업자와의 계약 또는 협정에 따라 결정된다. 즉,  $uw_{ij}^t$ 는 모형의 외생적인 요인으로 이러한 선박의 여유 적재공간이나 선사의 정책이나 운송업체와의 협약을 반영한다.

$$0 \leq v_{ij}^t \leq uw_{ij}^t \dots \dots \dots \text{식(2)}$$

for all  $j \in D \cup P, i \in D \cup P, t = 1, 2, \dots, T$

$uw_{ij}^t$  : 데포 j에서 데포 i로 기간 t에 이동하기 시작하는 컨테이너의 이동량에 대한 상한;  
 $j \in D \cup P, t = 1, 2, \dots, T$

③ 저장용량 제약

저장용량 제약은 해당 데포에서 공컨테이너를 저장할 수 있는 용량에 대한 상한이다. 이 제약은 자가 터미널이나 데포를 사용할 경우는 저장시설의 실제 용량이 되고, 임대 터미널이나 데포를 사용할 경우는 계약이나 협정에 따라 결정된다.

$$0 \leq w_j^t \leq uw_j^t \dots \dots \dots \text{식(3)}$$

for all  $j \in D \cup P, t = 1, 2, \dots, T$

$uw_j^t$  : 기간 t에 데포 j의 저장 용량의 상한;

$j \in D \cup P, t = 1, 2, \dots, T$

④ 임대 제약

임대 제약은 해당 지역의 임대업자가 기간 t에 보유하고 있는 컨테이너 수량으로 선사에서 기간 t에 데포 j에서 임대하여 사용할 수 있는 수량에 대한 상한이다. 선사들의 경영정책이나 임대업자와의 협약 등에 따라 특정 지역에서는 공컨테이너를 임대하지 않는 경우도 있다. 따라서 실제 모형을 적용할 때 임대 제약은 선사의 이러한 경영정책이나 임대업자와의 협약을 반영한다.

$$0 \leq \sum_{i \in D \cup P} b_{ij}^t \leq ub_j^t \dots \dots \dots \text{식(4)}$$

for all  $j \in D \cup P, t = 1, 2, \dots, T$

$ub_j^t$  : 기간 t에 데포 j의 임대 가능량;

$j \in D \cup P, t = 1, 2, \dots, T$

⑤ 목적함수

목적함수는 공컨테이너 운영관리를 위한 총비용을 최소화하는 것으로 데포에서의 보관비용, 운송비용, 임대비용 그리고 수요를 만족하지 못할 경우의 손실비용의 합으로 나타낸다.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j \in D \cup P} \left\{ \sum_{i \in DD_k^t} (c_{ij}^t v_{ij}^t + (\tau_{ij} \bar{c}_{ij}^t + \underline{c}_{ij}^t) b_{ij}^t) + c_j^t w_j^t + \bar{c}_j^t \delta_j^t \right\} \dots \dots \dots \text{식(5)}$$

네트워크 최적화 모형은 제약식 (1) - (4)와 결정 변수의 비음 제약하에서 식(5)를 최소화하는 것이 된다.

5. 방법론 개발

지금까지는 장래 수요와 공급이 확정적이라는 전제하에서 최적화 모형을 수립하였다. 그러나, 계획 시점에 예측한 수요와 공급은 실제 수요와 공급과 많은 차이가 있을 수 있다. 이러한 경우 최적화 모형을 사용하여 얻은 결과가 최선의 재배치 및 임대 방안이라고 볼 수는 없다. 이상적으로는 불확실



한 수요와 공급을 확률변수로 가정하고 모든 결정 변수들과의 상호작용을 충분히 설명할 수 있고, 계산량 관점에서 최적해를 용이하게 구할 수 있는 확률적모형을 수립하는 것이다. 그러나, 현실적으로 이러한 상반된 목표를 달성할 수 있는 모형을 수립하는 것은 용이하지 않다. 이 장에서는 장래 불확실한 수요와 공급의 영향을 적절히 반영하면서 계산이 용이한 실용적인 방법론을 제시한다.

먼저, 계획기간 시작 시기의 모든 비용과 관련된 정보를 이용할 수 있고, 수요와 공급과 같은 확률 변수가 구체화될 때의 의사결정변수들 사이에 발생하게 되는 복잡한 상호작용은 고려하지 않는다고 가정한다. 그러면, 계획기간 동안 장래 수요와 공급의 변화로 인한 의사결정변수들 사이의 상호작용은 장래 수요를 충족하기 위해 데포에서 유지해야 하는 재고수준에 의해서 설명될 수 있다. 즉, 본 논문에서 장래 공컨테이너의 수요와 공급의 불확실성에 대한 영향을 고려하는 방법은 먼저, 장래 수요와 공급을 확률변수로 가정하고 확률변수들의 값에 대한 변화 시나리오를 작성한다. 다음으로 각각의 시나리오에 대해 최적화 모형을 적용하여 재배치량, 임대량 그리고 재고량과 같은 의사결정변수들의 해를 구해서, 시나리오별 공컨테이너 재배치 및 임대비용과 재고수준의 차이로 인한 기회비용을 비교하여 공컨테이너 운영관리에 소요되는 총비용을 최소로 하는 시나리오를 찾아서 최적의 재배치 및 임대방안을 도출하는 것이다.

장래 수요와 공급의 불확실성으로 인한 재고수준의 증감에 대한 기회비용을 산정하기 위해서는 수요와 공급과 같은 확률변수가 구체화되었을 때의 재고수준을 알 수 있어야 하는데 이를  $\bar{w}_k$ 라고 정의한다. 그러나 계획 시작시점에서는 이러한 재고수준을 모르기 때문에 계획 시점에 알 수 있는 재고수준을 기준으로 모든 시나리오에 대한 상대적인 기회비용을 계산한다. 본 연구에서 공컨테이너 재배치 및 임대 비용과 재고수준의 증감에 따른 기회비용 사이에 발생하는 트레이드오프에 대한 영향을 모델링하기 위해 사용하는 기준이 되는 재

고수준은 평균 수요와 공급을 사용하였을 경우 최적화 모형에 의해 결정되는 재고수준으로  $\bar{w}_k$ 라고 정의한다. 한편 확률변수의 변화 시나리오에 따라 최적화 모형을 적용하여 얻어진 재고수준을  $w'_k$ 라고 정의하면,  $\bar{w}_k$ ,  $w'_k$ , 그리고  $w_k$ 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

i) 실제 재고가 많은 경우

$$w'_k \leq \bar{w}_k \leq w_k$$

ii) 실제 재고가 적은 경우

$$w'_k \geq \bar{w}_k \geq w_k$$

따라서 기회비용 산정의 기준이 되는 평균 수요와 공급을 사용하여 방법론을 적용할 경우 재고수준의 증감으로 인한 기회비용은  $|\bar{w}_k - w'_k|$ 가 되고, 수요와 공급 변화 시나리오에 의한 기회비용은  $|\bar{w}_k - w_k|$ 가 된다. 그러면 평균 수요와 공급에 의한 기회비용과 시나리오에 의한 기회비용의 차이는  $|\bar{w}_k - w'_k|$ 로 나타낼 수 있다. 평균 수요와 공급에 의한 기회비용에 대해 시나리오에 의해 발생하는 상대기회비용은 기준 재고보다 클 경우는 음(-)의 기회비용이 발생하고 적을 경우는 양(+)의 기회비용이 발생하게 된다.

한편, 어느 한 기간에 발생하는 재배치 및 임대비용을  $OC'$ 라고 정의하면, 최적화 모형의 목적함수는 다음 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{i=1, \dots, T} OC' \dots\dots\dots \text{식(6)}$$

그러면, 재고수준의 증감에 따른 기회비용은  $\bar{w}_k$ 와  $w'_k$ 의 함수이기 때문에  $IC'_k(w'_k, \bar{w}_k)$ 로 정의할 수 있다. 계획기간 동안의 모든 데포의 재고수준의 증감에 따른 기회비용의 합은 다음 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{t=1, \dots, T} \sum_{k \in P \cup D} IC'_k(w_k^t, \bar{w}_k^t) = \sum_{t=1, \dots, T} \sum_{k \in P \cup D} (\bar{w}_k^t - w_k^t) \cdot \widehat{C}_k \quad \dots \text{식(7)}$$

단,  $\widehat{C}_k$ 는 기간 t의 데포 k의 공컨테이너 재고에 대한 단위기회비용

그러면, 공컨테이너 운영관리에 소요되는 총비용은 식(8)이 된다.

$$TOC = \sum_{t=1, \dots, T} OC^t + \sum_{t=1, \dots, T} \sum_{k \in P \cup D} IC'_k(w_k^t, \bar{w}_k^t) \quad \dots \text{식(8)}$$

본 논문에서 제안한 방법론을 실제 적용할 때는 계획기간의 시작 시기부터 처음 몇 기간 동안의 수요와 공급은 확정적이라고 가정할 필요가 있다. 예를 들어, 계획기간이 시작되는 시점의 수요와 공급은 변화할 가능성이 거의 없고 또한, 수요와 공급의 변화가 의사결정변수에 미치는 영향을 알 수 있기 때문에 이러한 기간에 대해서는 수요와 공급을 확정적으로 가정할 수가 있다. 기간 1에서 기간 n까지의 수요와 공급을 확정적이라고 간주하고, 기간 n+1에서 기간 T까지의 수요와 공급을 확률적으로 간주할 경우 시나리오 s에 의한 공컨테이너 운영관리에 소요되는 총비용( $TOC_s$ )은 다음 식(9)와 같다.

$$TOC_s = \sum_{t=1, \dots, n} OC^t + \sum_{t=n+1, \dots, T} OC_s^t + \sum_{t=n+1, \dots, T} \sum_{k \in P \cup D} IC'_k(w_k^t, \bar{w}_k^t)$$

for all  $s \in S$   
 .....식(9)

식(9)에서 우변의 첫 번째 항은 수요와 공급을 확정적이라고 간주한 기간의 공컨테이너 재배치 및 임대비용, 두 번째 항은 수요와 공급이 불확실한 기간 동안의 시나리오 s에 의한 재배치 및 임대비용 그리고, 마지막 항은 수요와 공급이 불확실한 기간 동안의 시나리오 s에 의해 발생하는 재고수준의 증감에 따른 기회비용의 합을 의미한다.

이때, 시나리오 s에서 수요와 공급이 불확실한 기간 동안 발생하는 비용인 두 번째 항과 세 번째 항의 합을  $RC_s(w_k^t, \bar{w}_k^t)$ 라고 정의하고, 모든 시나

리오에 대해  $RC_s(w_k^t, \bar{w}_k^t)$ 를 구해서 최소가 되는 것을  $RC(w_k^t, \bar{w}_k^t)$ 라고 정의하면, 본 논문에서 제안하는 방법론에 의한 최적의 공컨테이너 운영관리 문제의 목적함수는 식(10)과 같다. 즉, 식(11)을 만족할 때의 재배치 및 임대계획이 최적 방안이 된다.

$$\sum_{t=1, \dots, n} OC^t + RC(w_k^t, \bar{w}_k^t) \quad \dots \text{식(10)}$$

$$RC(w_k^t, \bar{w}_k^t) = \text{Minimum}[RC_s(w_k^t, \bar{w}_k^t) | \forall S] \quad \dots \text{식(11)}$$

이상에서 살펴본 공컨테이너 재배치 및 임대 계획에 있어서 장래 수요와 공급의 불확실성으로 인해 발생하는 여러 가지 기회비용들 사이의 트레이드오프(trade off)는 다음 두 가지 측면에서 살펴볼 수 있다. 첫째, 충분한 안전재고를 유지하지 않았을 경우 화주의 화물 수송 수요를 충족하기 위해 발생하는 단기 임대비용과 재고유지비용 사이의 트레이드오프가 발생한다. 재고수준의 변화에 따른 이러한 기회비용이 정당화되기 위해서는 충분한 재고를 유지하지 않아서 발생하는 손실비용이 재고유지비용보다 커야 한다. 둘째, 실제 필요한 수요보다 많은 재고를 갖고 있을 경우 불필요한 재배치 비용이나 재고유지비용이 발생하게 된다. 이러한 경우의 기회비용은 다른 데포에서 수요를 충족하기 위해 단기 임대한 비용이나 각 데포별 재고유지비용의 차이로 설명될 수 있다. 따라서 데포별 공컨테이너가 남는 경우와 부족한 경우의 기회비용을 현실적으로 결정할 수 있다면 현실적인 제약 하에서 수요와 공급의 불확실성을 적절히 반영할 수 있을 것이다.

## 6. 모형 구현시 고려사항

본 연구의 주된 목적은 선사의 공컨테이너 운영관리를 위한 실용적인 모형을 개발하는 것으로, 모형수립을 중심으로 기술하였다. 이 장에서는 제안한 방법을 실제 업무에 적용하는 것과 관련하여 제기되는 몇 가지 문제들을 살펴본다.

제시한 최적화 모형은 선사의 공컨테이너 관리의 공간적 범위를 해상에서 내륙구간까지 확장하여 배송시스템을 현실적으로 반영하였으나, 실제 화주들의 수요와 공급 형태는 모형에서 고려하지 않았다. 현실적으로 선사의 공컨테이너 운영관리는 항만 또는 지역 레벨의 관리를 수행하고 있다. 실제 화주들의 수요와 공급 특성을 포함하기 위해서는 화주들을 소지역으로 집단화하면 본 연구에서 제시한 모형을 확장하여 용이하게 사용할 수 있다.

제안한 방법을 실제 선사의 운영업무에 사용할 때는 수요와 공급을 예측하고 데포별 공컨테이너 과부족에 대한 기회비용을 적절히 산정하기 위한 자료들을 효과적으로 수집하고 관리할 수 있어야 한다. 따라서, 자료수집과 관리를 위한 정보시스템의 존재가 선행되어야 한다.

마지막으로, 최적화 모형은 T 기간의 계획기간을 대상으로 하는 반면, 실제 선사의 업무는 훨씬 긴 기간 동안 계속된다. 실제 무한히 계속되는 것을 나타내기 위해 모형을 적용할 때는 계획기간 종료로 인한 왜곡현상(distortion)이 발생하게 되는데, 이러한 왜곡 현상을 최소화하기 위해서는 계획기간의 길이와 종료조건을 신중히 고려하여야 한다. 계획기간 길이는 계산의 용이성과 수요와 공급 예측의 신뢰성을 고려하여 합리적으로 결정해야 한다. 또한, 수요와 공급의 예측결과가 높은 오차를 포함하는 경우 비현실적인 해가 도출될 수 있다. 따라서, 계획기간의 종료시점의 데포별 재고수준에 대한 제약을 부과한다면 비현실적인 분석결과가 얻어지는 것을 방지할 수 있을 것이다.

## 7. 결론 및 향후 연구 과제

본 논문은 해상 컨테이너 운송업체의 공컨테이너 운영 관리와 관련된 여러 가지 의사결정요소와 구조에 대해 분석하여 정리하였으며, 선사의 공컨테이너 재배치 및 임대와 관련하여 동적 특성과 배송시스템의 특성을 적절히 반영하는 최적화 모형을 제시하였다. 또한 장래 수요와 공급의 변화를 설명하기 위해 재고 수준의 증감에 대한 기회비용

을 모형에 포함시킴으로써 수요와 공급의 불확실성에 대한 영향을 적절히 반영할 수 있는 방법론을 제시하였다.

따라서 본 논문에서 제안한 방법론은 수요 및 공급 자료를 집계할 수 있는 선사의 정보시스템과 연계하여 사용할 경우 공컨테이너 운영 관리를 위한 의사결정 지원시스템으로 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

향후 연구 과제를 살펴보면, 본 논문에서는 모형 수립을 용이하게 하기 위하여 컨테이너 종류를 단일 종류로 가정하고 여러 가지 종류의 컨테이너들의 대체 가능성을 고려하지 않았다. 그러나 선사의 공컨테이너 관리 형태를 보다 현실적으로 반영하기 위해서는 컨테이너들의 대체 가능성을 반영할 수 있도록 모형 확장을 위한 추가적인 연구가 필요하다.

## 참고문헌

- 1) 菅田幹也(1978), "Container 적정보유수에 관한 고찰", 해양한국, 8-9월호, Vol. 47-48.
- 2) 박진수(1990), 해상운송 컨테이너의 재고관리에 관한 연구, 동아대학교 석사학위논문.
- 3) K. K. Lai, Kokin Lam and W. K. Chan(1995), "Shipping Container Logistics and Allocation", Journal of Operational Research Society, Vol. 46, pp. 678-697.
- 4) Florez Humberto(1986), "Empty-Container Repositioning and Leasing : An Optimization Model", Ph. D. dissertation Polytechnic Institute of New York.
- 5) Cuimet, G.(1972), Empty Freight Car Distribution. M.Sc. thesis. Queens University, Canada.
- 6) Jordan, W.(1982), "The Impact of Uncertain Demand and Supply on Empty Rail Car Distribution", Ph. D. dissertation. Cornell University. Ithaca. NY.
- 7) French, P.(1983), "Overview and Survey of

Network Optimization Models That Can Be Used To Assist Railroad Empty Car Distribution", Association of American Railroads. Washington, DC.

- 8) Gao, Q.(1993), "An Operational Approach for Container Control in Liner Shipping", Logistics and Transportation Review, Vol. 30, No. 3, pp.267-282.

- 9) T. G. Crainic, M. Gendreau and P. Dejax(1993), "Dynamic and Stochastic Models for the Allocation of Empty Containers", Operations Research, Vol. 41, No.1.