

컨테이너터미널의 야드 재고량 분석에 대한 연구

Yard Inventory Analysis of Container Terminals

배종욱* · 김창곤**

Jong-Wook Bae · Chang-Gon Kim

〈목 차〉

- I. 서 론
 - II. 문헌 연구
 - III. 야드 재고량 변화 요인
 - IV. 재고모형의 수립
 - V. 수치실험
 - VI. 결론 및 추후연구
-

Abstract: In this paper, we analyzed the yard inventory of container terminals and how the yard inventory is affected by some factors such as dwell time of containers, container handling productivity, the inter-arrival time of ships, etc. Under the assumption of a static relationship among variables, mathematical models for estimating the yard inventory level were constructed. Formulating the yard inventory level as the function of allowable dwell time, handling productivity, containers per ship call and inter-arrival time of ships, we can trace the inventory level during each time period.

In the model we classify containers into three types: 1) export containers, 2) import containers, and 3) transshipment containers. A numerical example and the sensitivity analysis for some parameters are provided to help intuitively understand the characteristics of the suggested model. We can show that maximum inventory is more

* 한국해양수산개발원 책임연구원

** 한국해양수산개발원 책임연구원

sensitive to the allowable dwell time than to the quantity of containers per ship call, annual throughput, and loading/unloading productivity.

Key words: 1) Yard inventory, 2) containers per ship call, 3) handling productivity, 4) dwell time

I. 서론

컨테이너터미널은 대형 컨테이너선의 기항 및 양적하 생산성을 향상하기 위하여 수심 등 항만의 기반시설 확충과 최신 하역설비의 도입 등에 많은 관심을 가지고 있다. 이에 따른 터미널 개발의 투자위험을 감소시키기 위해서는 설계단계에서 터미널의 경제성과 생산성을 감안한 터미널의 적정 규모가 판단되어야 한다. 터미널의 적정 규모는 선박, 외부 트럭 등 이용 고객에 대한 적정 서비스 수준을 유지하면서 하역작업을 최적으로 수행할 수 있는 터미널 능력을 의미한다. 구체적으로 터미널의 능력은 선박 접안시설, 컨테이너 장치장 및 게이트 각각의 능력 조합에 의하여 표현된다.¹⁾

따라서 대형선이 기항하는 터미널의 경우에는 안벽에 충분한 아웃리치를 가진 컨테이너 크레인이 설치되어야 하며 일시에 많은 물량을 처리해야 함으로 지금까지의 터미널과 비교하여 보다 넓은 장치공간이 필요할 것으로 판단된다.²⁾ 따라서 설계단계에서 선박별 작업량 규모, 선박 도착 분포 등 개발 터미널의 주요 특성을 반영, 화물의 집중에 따라 발생될 수 있는 자원의 소요량을 정확히 분석하여 소요 안벽규모 및 소요 장치장 규모가 결정되어야 한다.

장치장에서의 취급능력은 터미널 내의 여러 시설 중에서 가장 취약한 시설영역으로 알려져 있다.³⁾ 접안시설 또는 게이트 등과 비교하여 장치장은 초기 개발 이후 취급능력의 추가 확보가 상대적으로 어려울 뿐 아니라 적정 장치능력을 초과하는 상황이 발생되면 안벽에서의 하역작업 생산성을 초래하게 된다.

장치장의 취급능력 중에서 보관능력은 장치장의 크기, 장치정책 및 운영방법에 의해 결정된다. 장치장 보관능력을 증가시키기 위해 화물을

1) Chung(1988)과 Silberholz(1991) 등은 컨테이너터미널의 생산성 분석을 위해 주요 시설물과 관련된 작업들에 대해 시뮬레이션을 실시함으로써 시스템 관점을 중요시하였다.

2) 강종희 외, 「21세기 글로벌 해운 물류」, 한국해양수산개발원, 2000, p.335.

3) Jansson, J. O, and D. Shneerson, *Port Economics*, The MIT Press, 1982, p9.

고단적하면 장치장의 밀도는 높아지지만 적하 또는 반출작업시에 특정 컨테이너를 뽑아 내는 능력인 접근성은 떨어진다.⁴⁾ 장치장 밀도가 높아지면 토지이용률은 향상되지만 컨테이너 취급비용은 증가하게 되는 경제적인 트레이드 오프 관계가 존재한다. 따라서 터미널의 설계에서는 터미널의 적정 처리 물동량에 부합되는 장치장 소요 공간을 예측하는 것이 목표작업 생산성의 달성에서도 매우 중요한 사항이다.

터미널의 장치장 설계를 위해서는 터미널 내의 화물에 대한 적정 재고량에 운영상의 여유를 감안하여 필요면적을 산정하고 이에 하역시스템의 효율성을 고려하여 최종 배치안을 작성한다. 이때 터미널의 재고량은 선박의 양적하작업과 외부 트럭의 반출입작업에 따라 변화하므로 적정 재고량은 화물이 집중되는 시점의 양과 기간을 고려하여 판단되어야 한다. 본 연구는 야드 재고량 분석에 초점을 맞추기 위해 장치장 취급 능력의 결정요인들 가운데 장치 단적수, 장치전략을 비롯한 장치정책 및 운영방법의 요소는 사전에 결정되었다고 가정하였다. 따라서 장치장 적정 소요규모는 적정 화물의 재고량에 장치 단적수를 고려하여 장치장에 필요한 슬롯수를 구하고 이에 블록 배치, 작업 여유공간 등의 장치정책 및 운영방법의 요소들을 감안하여 결정된다.⁵⁾

본 연구의 목적은 화물 재고량을 분석하는 기존의 방법들에 비해 보다 현실적인 측면에서 터미널의 특성을 반영하면서 활용이 간편한 합리적인 재고모형을 제시하는 것이다. 이를 위해 컨테이너터미널에서 취급되는 화물의 특성에 따라 재고량을 추정하는 수리모형을 구축하고 이를 이용하여 터미널에서 장치되는 컨테이너의 적정 재고량을 추정하고자 한다.

4) Watanabe는 다단적되어 있는 컨테이너 더미에서 특정 컨테이너를 끌어낼 때 어느만큼 재작업(rehandling)을 하지 않으면 안되는가를 분석 판정하기 위한 지표로 취출률(selectivity)을 사용하였다. 이때 취출률은 토지 이용률과 역행(reverse)관계를 갖는다.

5) 일반적으로 장치장 소요규모는 소요 재고량에 대해 평균 장치 단적수를 나눈 값에 분리계수와 운영여유를 감안하여 산출된 TGS(Total Ground Slot)로 표현된다.

II. 문헌 연구

터미널의 적정 처리능력과 소요자원을 판단하기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔다. 이들 중 많은 연구들은 안벽, 게이트와 같은 부분 시설 영역을 집중적으로 다루거나 터미널 전체의 종합적인 처리능력에 관심을 보였다.

본 연구에서 다루는 장치장 소요면적에 대한 기존의 연구 방향은 두 가지로 구분될 수 있다. 하나는 UNCTAD(1973), Frankel(1987)의 연구와 같이 장치장의 정적인 측면에서 재고량을 분석하는 방법이다. 이 방법에서는 장치장을 이용하는 화물의 연간 회전율을 산출하여 평균 재고량을 구하고 이에 피크계수 등 관련 계수를 고려하여 소요 재고량을 산정한다. 다른 하나는 동적인 특성을 반영하기 위해 터미널에 대한 시뮬레이션 분석⁶⁾을 실시하여 일정기간 동안에 대해 장치장에서의 재고량 변화를 수집한 다음에 적정 분위량에 대해 소요 재고량을 구하는 방법이다.

UNCTAD에서는 화물의 소요 재고량을 식 (1)과 같은 방법으로 계산하였다.

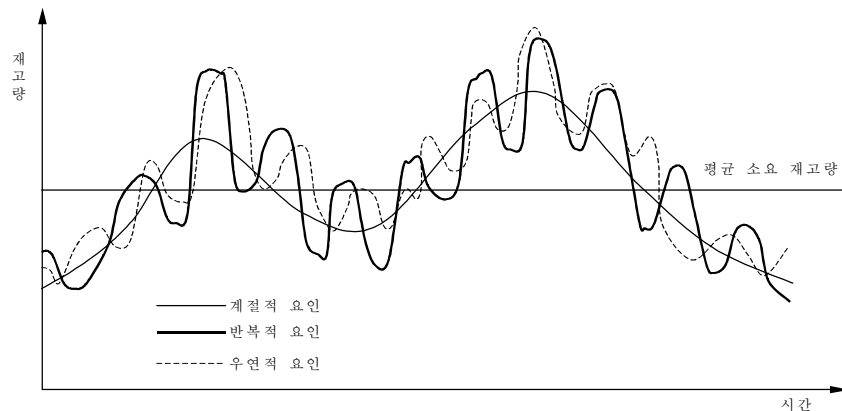
$$\text{소요 재고량} = \frac{\text{연간 물동량} \times \text{평균 장치기간}}{\text{연간 작업시간}} \times \text{피크계수} \dots\dots\dots(1)$$

식(1)에서 연간 물동량은 터미널의 적정 안벽처리능력 범위 내에서 취급되는 물동량을 의미한다. 그리고 평균장치기간은 터미널의 외부에서 들어와 다시 빠져나가기까지 화물이 장치장에서 보관되는 평균기간을 말한다. 연간 물동량에 평균 장치기간을 곱하여 장치장에서 보관해야 하는 총 화물량을 구한 다음 연간 운영시간을 나누어 단위시간의 재

6) UNCTAD(Port Development, 1985)는 터미널 재고수준에 대한 주요 영향 요인으로 선박 작업량, 선박 도착분포, 내륙운송분포, 선박 양적하율을 언급하였다. 재고분석에 있어 영향 요인들의 동적인 특성을 반영할 수 있는 적절한 대안으로 시뮬레이션 분석을 제시하였다. 컨테이너터미널에 대한 시뮬레이션 분석을 수행한 Elizabeth(1996)의 경우에도 이를 효과적인 재고량 분석 방법으로 제안하고 있다.

고량을 구한다. 그리고 회전율에 따라 구해진 평균 소요 재고량을 화물의 집중화에 따라 발생하는 최대 소요 재고량으로 보정해 주기 위해 기존 터미널의 실적자료를 바탕으로 분석되는 피크계수를 사용한다. 이는 계절별 또는 월별로 물동량이 증가되는 계절적 요인, 선박 입출항에 따라 양적화 및 반출입 화물량이 증가하는 반복적 요인 그리고 선박 도착 간격, 선박작업량, 반출입물 변동에 따른 우발적 요인을 포함한다. 앞의 두 가지 요인은 정적인 측면에서 분석될 수 있다면 세 번째 요인은 동적인 요소로 분류된다(<그림-1> 참조).

〈그림-1〉 장치장 재고량의 변화



Frankel의 경우도 회전율 개념을 도입한 점에서는 유사하지만 식 (2)와 같이 변동요인에 따른 화물의 집중화를 묘사하는 피크계수 대신에 장치기간의 편차를 고려하여 장치되어야 하는 화물량을 계산한다는 점에 차이가 있다.

소요 재고량=

$$\frac{\text{연간물동량}}{\text{연간 작업시간}} \times (\text{평균 장치기간} + 2 \times \text{장치기간의 표준편차}) \dots\dots\dots(2)$$

기존의 정적인 분석은 평균화된 재고량에 대해 입항선박의 작업량이

나 입항간격시간, 터미널의 하역작업 생산성에 대한 특성을 명확하게 반영하지 못하는 피크계수 또는 장치기간의 편차를 반영한 것으로써, 선박의 양적하작업에서 발생될 수 있는 피크시의 재고량을 언급하지 못하는 문제점을 지니고 있다.

시뮬레이션을 이용하는 방법은 입항예정선박의 작업물량, 도착간격시간 그리고 작업 생산성을 시뮬레이션 모델에 묘사하여 장치장에 있는 화물 재고량의 증가나 감소를 분석한다. 그렇지만 실험에 필요한 시간과 비용이 많이 소요되고 변동 요인에 따른 영향을 신속하게 분석하기 힘들어 결과의 신뢰성이 떨어질 가능성이 높다는 단점이 있다.

장치장 분석과 관련된 연구에는 재고량 측면뿐 아니라 취급능력을 산정하기 위한 연구도 있다. 장치장 취급능력의 연구에서 장치장의 보관능력과 장비의 처리능력이 상호 관련되므로 열수, 단수, 블록수 등에 대한 배치안과 투입되는 장비규모가 함께 고려되는 것이 보다 최적의 결과를 도출할 수 있을 것이다. Roux(1996)와 Taleb-Ibrahimi(1989)는 각각 트랜스퍼 크레인을 사용하는 수입 장치장과 수출 장치장에 대해서 장치장 운영전략을 고려하여 장치장을 분석하였고, 김홍배(1999)는 수입 장치장에 대해 장치장 건설비용과 장비비용 등에 대한 경제성 분석을 하였다. 그렇지만 이들의 연구에서도 장치장 재고량은 방법론에는 차이가 있지만 평균적인 개념을 응용하고 있다.

장치장 처리능력에 관한 연구들을 살펴보면 터미널에 적용되는 하역시스템이나 운영 알고리즘과 매우 밀접한 관련을 맺지만, 본 연구에서는 하역시스템과 운영 알고리즘의 영향을 배제하고 선박의 입출항 및 외부트럭의 반출입과 관련되어 장치장의 재고량 변화를 분석하는 것으로 연구의 범위를 한정한다.

Ⅲ. 야드 재고량 변화 요인

컨테이너터미널의 화물은 일반 수입화물, 일반 수출화물 그리고 환적

화물로 구분하였다. 일반 수입화물은 선박에서 내려져 일정기간 장치된 후 내륙 화주에 의해 반출되는 컨테이너를 의미하고, 내륙 화주로부터 반입된 후 장치장을 거쳐 선박에 실려 나가는 컨테이너는 일반 수출 화물로 분류하였다. 환적화물은 선박으로부터 내려져 내륙으로 반출되지 않고 일정기간을 장치장에서 보관된 후 다른 입항 선박에 적하되는 화물을 의미한다.

여기서 일반 수출입화물은 외부트럭의 반출입작업을 통해 장치·이적과정을 밟게 되므로 화물의 도착이나 반출이 장치기간 동안 연속적으로 발생하지만 환적 화물의 경우에는 선박의 환적 적하작업시간 동안에만 장치장 내에서의 재고량 변화가 발생함으로써 일반 수출입화물과는 장치장의 이용 패턴에 있어서 차이가 있다.

장치장에서 화물의 재고량 증감 변화를 간단히 살펴보면 다음과 같다. 일반 수입화물의 경우에는 선박도착 후 양하기간 동안은 양하 생산성에 따라 재고량이 증가하고, 양하가 완료된 후에는 수입화물의 장치허용기간 동안 반출률에 따라 재고량이 감소한다. 그리고 일반 수출화물의 경우에는 장치허용기간에는 반입률에 따라 재고량이 증가하고 집안 선박에 적하되는 기간에는 적하 생산성에 따라 재고량이 감소한다.

또한 작업 생산성을 향상하기 위하여 대부분의 터미널에서 일반 수출입화물과 환적화물의 장치허용기간을 차별화 하고 있고 화물별로 장치지역을 분리 운영하고 있기 때문에 위와 같은 재고량 변화 외에도 작업 생산성 향상을 위해 어느 정도의 여유율을 고려하여 최종적으로 소요 장치장 규모를 산정하여야 한다. 본 연구에서 화물 재고량 분석을 위해 고려되는 주요 요인의 내용을 정리하면 다음과 같다.

- i) 선박 도착간격 : 외부 트럭의 반출입과 하역작업은 선박 도착시점을 기준으로 발생되기 때문에 선박 도착간격시간은 화물이 터미널에 집중되는 시점에 영향을 미친다.
- ii) 선박별 작업량 : 최대 재고량은 집안 선박에서 수행되는 작업량에 의존한다.
- iii) 하역작업 생산성 : 화물의 집중화가 지속되는 시간과 밀접한 관련을

가진다.

- iv) 장치허용기간 : 터미널에 장치된 화물별 장치허용기간에 따라 장치 재고량은 달라질 수 있다.
- v) 반출입률 : 외부 트럭에 의해 장치장의 화물이 들어오거나 빠져나감으로써 재고량에 영향을 미친다.

즉 선박 도착간격, 선박별 작업량, 하역작업 생산성, 장치허용기간 내에서의 반출입률 등에 의하여 재고량이 변함을 알 수 있다.

$$\text{재고량} = f(\text{선박 도착간격, 선박별 작업량, 장치허용기간, 하역작업 생산성, 반출입률})$$

이때 선박 도착간격, 선박별 작업량, 반출입률은 외부로부터 입력되는 전제조건이고 하역작업 생산성과 장치허용일수는 터미널의 운영전략에 의해 결정되는 독립변수로 분류된다. 따라서 재고모형을 통해 재고량을 독립변수 상호간의 관계로 표현한다면 적정 하역 생산성을 유지할 수 있는 장치장의 소요공간을 산정하는 데 효과적으로 활용될 수 있다.

IV. 재고모형의 수립

1. 가정 및 기호

본 절에서는 일반 수출입화물과 환적화물의 특성을 고려하여 화물별 재고에 대한 모형을 구축, 분석하고자 한다. 일반 수출, 일반 수입, 그리고 환적화물은 장치장에 쌓이고 빠져나가는 과정이 다르고 재고량이 서로 독립적으로 발생하므로 본 연구에서는 유도과정을 간단히 하기 위해 화물별로 재고모형을 제시한다.

기본적으로 컨테이너터미널의 장치 재고량은 선박도착시점을 전후로

하여 변한다. 즉 수출화물의 경우에는 선박 예정도착시각에 맞추어 터미널에 반입된다. 이때 수출화물의 무료장치허용기간을 고려하여 터미널에 반입되기 시작하여 선박도착직전까지 반입된다. 또한 수입화물의 경우에도 선박으로부터 양하된 후부터 반출되기 시작하여 수입화물의 장치허용기간 내에서 반출된다. 즉 장치장의 재고량 변화는 선박도착시점을 전후로 하여 반복됨을 알 수 있다. 재고모형에서는 이러한 사실에 착안하여 선박도착간격을 단위 사이클로 하여 장치재고모형을 구축하였다.

또한 문제를 단순화하기 위해 선석이 하나인 터미널을 가정함으로써 터미널에서 한 선박이 작업 중인 동안에 또 다른 선박이 도착하는 경우는 발생하지 않는다. 야드 재고량 분석을 위한 수리모형을 제시하기 위해 도입한 가정은 다음과 같다.

- i) 입항 선박의 대기는 발생하지 않으며 선박간 도착간격시간은 동일하다.
- ii) 모든 선박의 작업량은 동일하다.
- iii) 화물별 장치허용기간의 반출입률은 일정하다.
- iv) 수출 컨테이너는 선박의 접안 전까지 반입되고 수입 컨테이너는 하역작업 종료 이후부터 반출된다.
- v) 환적 화물은 장치허용기간 중에 입항하는 후속 선박들에 동일한 수량으로 실려 장치허용기간 내에 모두 적하된다.

본 연구에서는 재고량 분석에 필요한 변동요인이 일정하게 유지되는 정적인 상황을 전제로 화물 재고량을 산출할 수 있는 수리모형을 제시하는데, 이에 필요한 주요 기호는 다음과 같다.

- t_0 : 선박의 접안 시점
- t_1 : 선박의 양하 완료 시점
- t_2 : 선박의 적하 완료 시점
- t_3 : 다음 선박의 접안 시점
- t : 사이클 시간에서의 시각 $t_0 \leq t < t_3$

- T_u : 선박의 양하작업시간 $[t_0, t_1)$
 T_l : 선박의 적하작업시간 $[t_1, t_2)$
 T_b : 선박의 이안 후 다음 선박의 접안까지의 간격시간 $[t_2, t_3)$
 T_a : 선박의 도착간격시간으로 $T_u + T_l + T_b$ 임. 여기서는 한 사이클 시간을 의미함. $[t_0, t_3)$
 Q_L : 선박의 수출 컨테이너 작업 물량
 Q_D : 선박의 수입 컨테이너 작업 물량
 Q_S : 선박의 환적 양하 물량
 T_r : 수출화물의 무료 장치 기간
 T_d : 수입화물의 무료 장치 기간
 T_s : 환적화물의 무료 장치 기간
 $y_i(t)$: 현재 입항 선박 이후 i 번째 입항 예정 선박의 수출화물이 t 시점에 장치장에 있는 물량
 $g_j(t)$: 현재 입항 선박 이전 j 번째 출항 선박의 수입화물이 t 시점에 장치장에 있는 물량
 $z(t)$: 접안 선박의 수출화물 중 t 시점에 장치장에 있는 물량
 $w(t)$: 접안 선박의 수입화물 중 t 시점에 장치장에 있는 물량
 n : 사이클 시간동안 일반 수출화물을 반입하는 선박수 $\lceil T_r / T_a \rceil$
 m : 사이클 시간동안 일반 수입화물을 반출하는 선박수 $\lfloor \frac{(T_d + T_u + T_l)}{T_a} \rfloor$
 p : 사이클 시간동안 환적화물을 적하하는 선박수 $\lfloor T_s / T_a \rfloor$
 S_n : 현재 입항 선박 이후로 n 번째 선박의 수출 컨테이너가 장치장에 들어오기 시작하는 시점으로 $nT_a - T_r$ 임.
 E_m : 현재 입항 선박 이전 m 번째 선박의 수입 컨테이너가 장치장에서 빠져나가는 것이 종료된 시점으로 $T_d + T_u + T_l - mT_a$ 임.
 $L(t)$: t 시점에 장치장에 있는 수출 컨테이너 물량

$D(t)$: t 시점에 장치장에 있는 수입 컨테이너 물량

$S(t)$: t 시점에 장치장에 있는 환적 컨테이너 물량

수리모형에서 단위 사이클은 재고량 변화가 동일하게 발생, 반복하는 최소 단위의 기간을 의미한다. 따라서 단위 사이클에 대한 분석결과를 이용하여 안정화된 상태에서의 재고량을 분석·유추할 수 있다. 본 연구의 수리모형은 선박 도착간격시간을 단위 사이클로 정의하였다. 선박 도착간격 내에서의 장치장 재고량은 다음 사이클 시간에도 동일한 형태를 나타낸다.

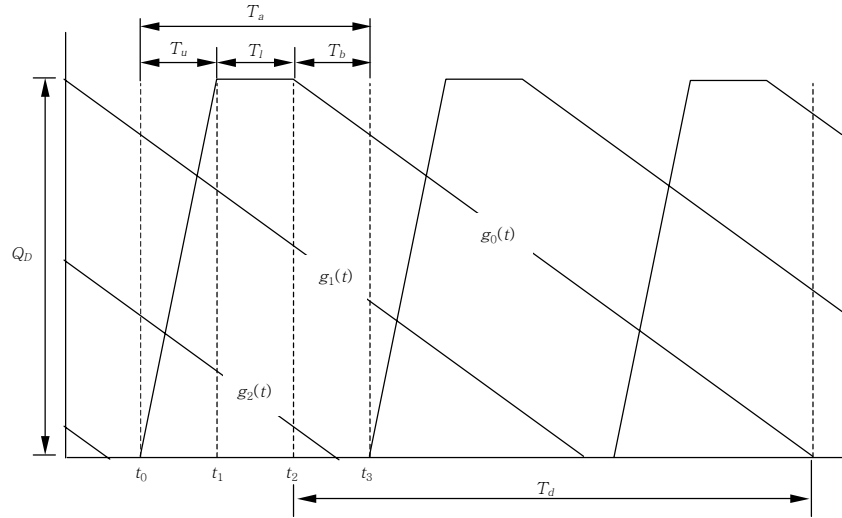
$$\text{사이클 시간 : } T_a = T_u + T_l + T_b$$

앞으로서 설명하는 임의의 시점 t 는 단위 사이클 내에서의 시간변화를 나타내고 $t_0 \leq t < t_3$ 의 범위를 갖는다.

2. 일반 수입화물에 따른 재고량 변화

장치장에서 일반 수입화물의 재고량 변화를 <그림-2>에 간단히 묘사하였다. 기준 선박은 t_0 시점에 접안하여 T_u 시간 동안 Q_D 의 일반 수입화물을 장치장에 내린다. t_2 시점부터 기준 선박의 화물은 T_d 동안 내륙 화주에 의해 지속적으로 터미널에서 반출된다. 기준 선박의 일반 수입 물량을 제외할 때 사이클 기간동안 반출되는 일반 수입화물과 관련되는 선박수 m 은 $\lfloor \frac{T_u + T_l + T_d}{T_a} \rfloor$ 으로 계산할 수 있다. 예를 들면 <그림-2>에서 T_a 동안 반출이 발생하는 선박은 기준 선박을 제외하면 $g_1(t)$ 와 $g_2(t)$ 와 관련되는 2대이다. 이때 기준 선박 이전 m 번째 선박의 일반 수입화물들의 반출 종료가 되는 E_m 은 $T_d + T_u + T_l - mT_a$ 이다. 사이클 기간 내에서는 반출이 종료되는 선박은 항상 한 대가 존재한다.

〈그림-2〉 선박 입출항에 따른 일반 수입화물의 재고량 변화



t_1 에서 기준 선박의 일반 수입화물 재고량은 최고점에 도달하였다가 선박이 적하작업을 마친 t_2 이후부터 각 선박과 관련된 수입화물의 재고량은 장치허용기간동안 점차적으로 반출되면서 감소한다. 각 선박의 장치허용기간이 지나면 장치장에서 해당 선박과 관련된 수입화물의 재고량은 0이 된다.

반출 개시 이후 장치장에 있는 기준 선박의 수입화물 재고량 $g_0(t)$ 는 $t_2 \leq t \leq t_3$ 에서 $-\frac{Q_D}{T_d}(t - T_u - T_l) + Q_D$ 이고, 이전의 선박들과 관련된 일반 수입화물의 재고량 $g_j(t)$ 는 $-\frac{Q_D}{T_d}(t + T_b + (j-1)T_a) + Q_D$ 이다. 그리고 $t_0 < t \leq t_1$ 에서 양하작업 기간동안 장치장에 누적되는 물량 $w(t)$ 는 $\frac{Q_D}{T_u}t$ 이다. 장치장에서 일반 수입 컨테이너의 재고량 $D(t)$ 는 기준 선박의 수입화물을 기준으로 증가구간인 $t_0 < t \leq t_1$, 유지구간인 $t_1 < t \leq t_2$, 그리고 감소구간인 $t_2 < t \leq t_3$ 로 구분할 수 있다. $D(t)$ 를 구하기 위해서는 기준

선박과 관련된 물량 외에 기준 선박의 선행 선박들의 수입 화물에 대한 재고량 $g_j(t)$ ($1 \leq j \leq m$)가 고려되어야 한다. 이때 $t_0 < t \leq t_1$, $t_1 < t \leq t_2$, $t_2 < t \leq t_3$ 의 세 구간에 대한 $D(t)$ 를 정리하면 E_m 에 따라 $g_j(t)$ ($1 \leq j \leq m$)가 달라지므로 아래의 식(3)에서 식(14)와 같이 유도된다. $t \leq E_m$ 인 경우에는 $D(t)$ 에 $g_m(t)$ 가 제외된다. 식(3)과 식(4)를 비교하면 기준 선박 이전의 선행 선박과 관련된 물량이 식(3)에서는 $\sum_{j=1}^m g_j(t)$ 이지만 식(4)에서는 $\sum_{j=1}^{m-1} g_j(t)$ 이 된다.

$t_0 < E_m \leq t_1$ 인 경우

$$D(t) = w(t) + \sum_{j=1}^m g_j(t) = \frac{Q_D}{T_u} t - \frac{Q_D}{T_d} m(t + T_b + \frac{m-1}{2} T_a - T_d) \\ t_0 < t \leq E_m \dots\dots\dots (3)$$

$$D(t) = w(t) + \sum_{j=1}^{m-1} g_j(t) = \frac{Q_D}{T_u} t - \frac{Q_D}{T_d} (m-1)(t + T_b + \frac{m-2}{2} T_a - T_d) \\ E_m < t \leq t_1 \dots\dots\dots (4)$$

$$D(t) = Q_D + \sum_{j=1}^{m-1} g_j(t) = Q_D - \frac{Q_D}{T_d} (m-1)(t + T_b + \frac{m-2}{2} T_a - T_d) \\ t_1 < t \leq t_2 \dots\dots\dots (5)$$

$$D(t) = \sum_{j=0}^{m-1} g_j(t) = Q_D - \frac{Q_D}{T_d} (m-1)(t + T_b + \frac{m-2}{2} T_a - T_d) - \frac{Q_D}{T_d} (t - T_u - T_d) \\ t_2 < t \leq t_3 \dots\dots\dots (6)$$

$t_1 < E_m \leq t_2$ 인 경우

$$D(t) = w(t) + \sum_{j=1}^m g_j(t) = \frac{Q_D}{T_u} t - \frac{Q_D}{T_d} m(t + T_b + \frac{m-1}{2} T_a - T_d) \\ t_0 < t \leq t_1 \dots\dots\dots (7)$$

$$D(t) = Q_D + \sum_{j=1}^m g_j(t) = Q_D - \frac{Q_D}{T_d} (m-1)(t + T_b + \frac{m-1}{2} T_a - T_d) \\ t_1 < t \leq E_m \dots\dots\dots (8)$$

$$D(t) = Q_D + \sum_{j=1}^{m-1} g_j(t) = Q_D - \frac{Q_D}{T_d} (m-1) (t + T_b + \frac{m-2}{2} T_a - T_d) \\ E_m < t \leq t_2 \dots\dots\dots (9)$$

$$D(t) = \sum_{j=0}^{m-1} g_j(t) = Q_D - \frac{Q_D}{T_d} (m-1) (t + T_b + \frac{m-2}{2} T_a - T_d) - \frac{Q_D}{T_d} (t - T_u - T_l) \\ t_2 < t \leq t_3 \dots\dots\dots (10)$$

$t_2 < E_m \leq t_3$ 인 경우

$$D(t) = w(t) + \sum_{j=1}^m g_j(t) = \frac{Q_D}{T_u} t - \frac{Q_D}{T_d} m (t + T_b + \frac{m-1}{2} T_a - T_d) \\ t_0 < t \leq t_1 \dots\dots\dots (11)$$

$$D(t) = Q_D + \sum_{j=1}^m g_j(t) = Q_D - \frac{Q_D}{T_d} m (t + T_b + \frac{m-1}{2} T_a - T_d) \\ t_1 < t \leq t_2 \dots\dots\dots (12)$$

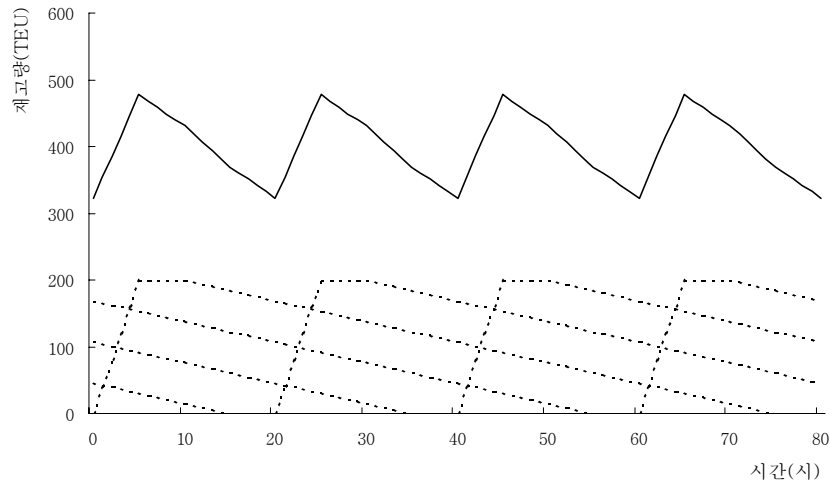
$$D(t) = \sum_{j=0}^m g_j(t) = Q_D - \frac{Q_D}{T_d} m (t + T_b + \frac{m-1}{2} T_a - T_d) - \frac{Q_D}{T_d} (t - T_u - T_l) \\ t_2 < t \leq E_m \dots\dots\dots (13)$$

$$D(t) = \sum_{j=0}^{m-1} g_j(t) = Q_D - \frac{Q_D}{T_d} (m-1) (t + T_b + \frac{m-2}{2} T_a - T_d) - \frac{Q_D}{T_d} (t - T_u - T_l) \\ E_m < t \leq t_3 \dots\dots\dots (14)$$

식(3)~(14)를 정리하면 $D(t)$ 는 $t_0 < t \leq t_1$ 에서 단조증가이고, $t_1 < t \leq t_2$ 와 $t_2 < t \leq t_3$ 에서는 단조감소이며, $D(t_0) = D(t_3)$ 이다. 따라서 사이클 내에서의 최소 재고량은 t_0 와 t_3 에서 발생하고 최대 재고량은 t_1 에서 발생한다.

예를 들어 $Q_D = 200$, $T_u = T_l = 5$ 시간, $T_a = 20$ 시간, 그리고 $T_d = 65$ 시간이라고 가정하면 $m = 3$, $E_m = 15$ 로 식(11)~(14)를 이용하여 장치장의 재고를 추정한 결과를 <그림-3>에 나타내었다. 점선으로 표시된 선은 선박별 일반 수입화물 재고량을 의미하고 실선은 터미널에 장치되어진 일반 수입화물 전체에 대한 재고량의 변화를 보여준다.

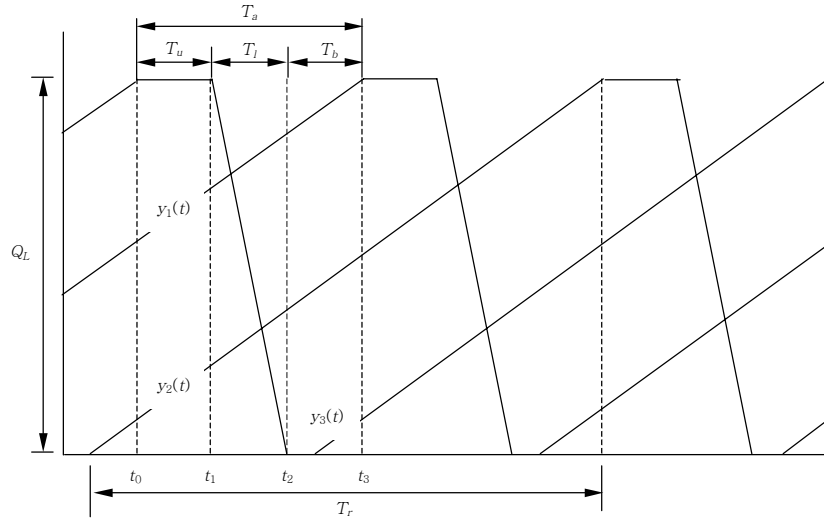
〈그림-3〉 일반 수입화물의 장치장 재고 추정



3. 일반 수출화물에 따른 재고량 변화

컨테이너터미널 장치장에서 수출화물의 재고량 변화를 <그림-4>에 묘사하였다. 기준 선박의 수출화물은 $t_0 - T_r$ 부터 t_0 까지 내륙 화주로부터 일정한 도착률로 반입되어 장치장에 보관된 후 집안 선박의 양하작업이 종료되는 t_1 부터 T_l 기간동안 선박에 실려진다. 사이클 기간동안 반입되는 일반 수출화물과 관련되는 선박수 n 은 $\lceil T_r/T_a \rceil$ 이 된다. <그림-4>에서 T_a 동안 반입이 발생하는 선박은 $y_1(t)$ 및 $y_2(t)$ 와 관련되는 2대이다. 기준 선박 이후 n 번째 선박의 반입 컨테이너가 장치장에 들어오기 시작하는 시점 S_n 은 $nT_a - T_r$ 이다. 사이클 기간 내에서 반입이 시작되는 선박은 항상 한 대가 존재한다.

〈그림-4〉 선박 입출항에 따른 일반 수출화물의 재고량 변화



기준 선박의 일반 수출화물은 t_0 시점이 되면 최고점에 도달하였다가 선박이 적하작업을 하는 동안 점차 감소한 후 적하작업이 종료되는 t_2 시점이 되면 해당 선박으로 수출하는 컨테이너 수는 0이 된다. 여기서 기준 선박 이후의 입항 예정 선박과 관련되어 사이클 기간 동안 반입되는 수출화물의 재고량 $y_i(t)$ 는 $\frac{Q_L}{T_r}t + \frac{Q_L}{T_r}(T_r - iT_a)$ 이고 $t_1 < t \leq t_2$ 의 적하작업 기간동안 장치장에서 빠져나가는 물량 $z(t)$ 는 $-\frac{Q_L}{T_l}(t - T_u) + Q_L$ 이다.

장치장에서 일반 수출 컨테이너 재고량 $L(t)$ 는 기준 선박의 수출화물을 기준으로 반입 완료된 Q_L 의 수출화물이 장치되어 있는 $t_0 < t \leq t_1$, 적하작업을 통해 장치장의 재고가 감소하는 $t_1 < t \leq t_2$, 그리고 재고량이 0인 $t_2 < t \leq t_3$ 로 구분할 수 있다. $L(t)$ 를 구하기 위해서는 기준 선박과 관련된 물량 외에 기준 선박 이후에 입항하는 선박들의 수출화물에 대한

재고량 $y_i(t)$ ($1 \leq j \leq n$)가 고려되어야 한다. 이때 $t_0 < t \leq t_1$, $t_1 < t \leq t_2$, $t_2 < t \leq t_3$ 의 세 구간에 대한 $L(t)$ 를 정리하면 S_n 에 따라 $y_i(t)$ ($1 \leq j \leq n$)가 달라지므로 아래의 식(15)에서 식(26)와 같이 유도된다. $t \geq S_n$ 인 경우에는 $D(t)$ 에서 $y_n(t)$ 이 포함된다. 식(15)와 식(16)를 비교하면 기준 선박 이후 선박과 관련된 물량이 식(15)에서는 $\sum_{i=1}^{n-1} y_i(t)$ 이지만 식(16)에서는 $\sum_{i=1}^n y_i(t)$ 이 된다.

$t_0 < S_n \leq t_1$ 인 경우

$$L(t) = Q_L + \sum_{i=1}^{n-1} y_i(t) = Q_L + \frac{Q_L}{T_r} (n-1)(t + T_r) - \frac{n(n-1)}{2T_r} Q_L T_a$$

$$t_0 < t \leq S_n \dots\dots\dots (15)$$

$$L(t) = Q_L + \sum_{i=1}^n y_i(t) = Q_L + \frac{Q_L}{T_r} n(t + T_r) - \frac{n(n+1)}{2T_r} Q_L T_a$$

$$S_n < t \leq t_1 \dots\dots\dots (16)$$

$$L(t) = z(t) + \sum_{i=1}^n y_i(t) = Q_L + \frac{Q_L}{T_r} n(t + T_r) - \frac{n(n+1)}{2T_r} Q_L T_a - \frac{Q_L}{T_l} (t - T_u)$$

$$t_1 < t \leq t_2 \dots\dots\dots (17)$$

$$L(t) = \sum_{i=1}^n y_i(t) = \frac{Q_L}{T_r} n(t + T_r) - \frac{n(n+1)}{2T_r} Q_L T_a$$

$$t_2 < t \leq t_3 \dots\dots\dots (18)$$

$t_1 < S_n \leq t_2$ 인 경우

$$L(t) = Q_L + \sum_{i=1}^{n-1} y_i(t) = Q_L + \frac{Q_L}{T_r} (n-1)(t + T_r) - \frac{n(n-1)}{2T_r} Q_L T_a$$

$$t_0 < t \leq t_1 \dots\dots\dots (19)$$

$$L(t) = z(t) + \sum_{i=1}^{n-1} y_i(t) = Q_L + \frac{Q_L}{T_r} (n-1)(t + T_r) - \frac{n(n-1)}{2T_r} Q_L T_a - \frac{Q_L}{T_l} (t - T_u)$$

$$t_1 < t \leq S_n \dots\dots\dots (20)$$

$$L(t) = z(t) + \sum_{i=1}^n y_i(t) = Q_L + \frac{Q_L}{T_r} n(t + T_r) - \frac{n(n+1)}{2T_r} Q_L T_a - \frac{Q_L}{T_l} (t - T_u) \\ S_n < t \leq t_2 \dots\dots\dots (21)$$

$$L(t) = \sum_{i=1}^n y_i(t) = \frac{Q_L}{T_r} n(t + T_r) - \frac{n(n+1)}{2T_r} Q_L T_a \\ t_2 < t \leq t_3 \dots\dots\dots (22)$$

$t_2 < S_n \leq t_3$ 인 경우

$$L(t) = Q_L + \sum_{i=1}^{n-1} y_i(t) = Q_L + \frac{Q_L}{T_r} (n-1)(t + T_r) - \frac{n(n-1)}{2T_r} Q_L T_a \\ t_0 < t \leq t_1 \dots\dots\dots (23)$$

$$L(t) = z(t) + \sum_{i=1}^{n-1} y_i(t) = Q_L + \frac{Q_L}{T_r} (n-1)(t + T_r) - \frac{n(n-1)}{2T_r} Q_L T_a - \frac{Q_L}{T_l} (t - T_u) \\ t_1 < t \leq t_2 \dots\dots\dots (24)$$

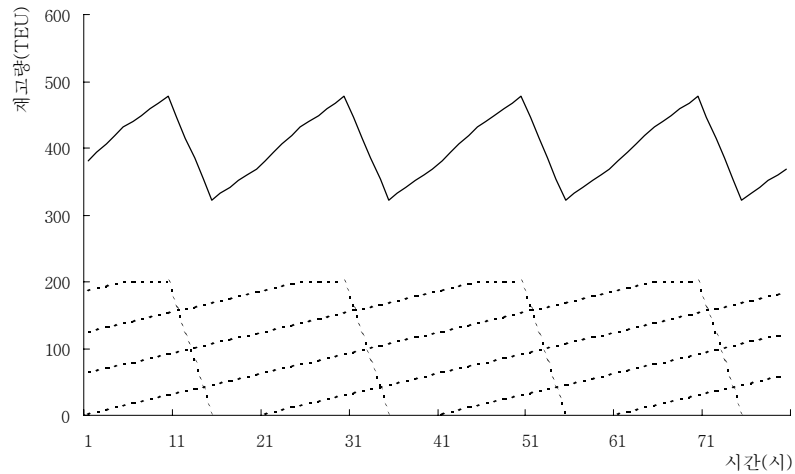
$$L(t) = \sum_{i=1}^{n-1} y_i(t) = \frac{Q_L}{T_r} (n-1)(t + T_r) - \frac{n(n-1)}{2T_r} Q_L T_a \\ t_2 < t \leq S_n \dots\dots\dots (25)$$

$$L(t) = \sum_{i=1}^n y_i(t) = \frac{Q_L}{T_r} n(t + T_r) - \frac{n(n+1)}{2T_r} Q_L T_a \\ S_n < t \leq t_3 \dots\dots\dots (26)$$

식(15)~(26)을 정리하면 $L(t)$ 는 $t_0 < t \leq t_1$ 와 $t_2 < t \leq t_3$ 에서 단조증가이고, $t_1 < t \leq t_2$ 에서는 단조감소이며, $L(t_0) = L(t_3)$ 이다. 따라서 사이클 내에서의 최소 재고량은 t_2 에서 발생하고 최대 재고량은 t_1 에서 발생한다.

예를 들어 $Q_L = 200$, $T_u = T_l = 5$ 시간, $T_a = 20$ 시간, 그리고 $T_r = 65$ 시간이라고 가정하면 $n = 3$, $S_n = 15$ 로 식(15)~(26)을 이용하여 장치장의 재고를 추정한 결과를 <그림-5>에 표시하였다. 그림에서 점선으로 표시된 선은 선박별 재고량을 의미하고 실선은 일반 수출화물 전체 재고량의 변화를 보여준다.

〈그림-5〉 일반 수출화물의 재고량 추정

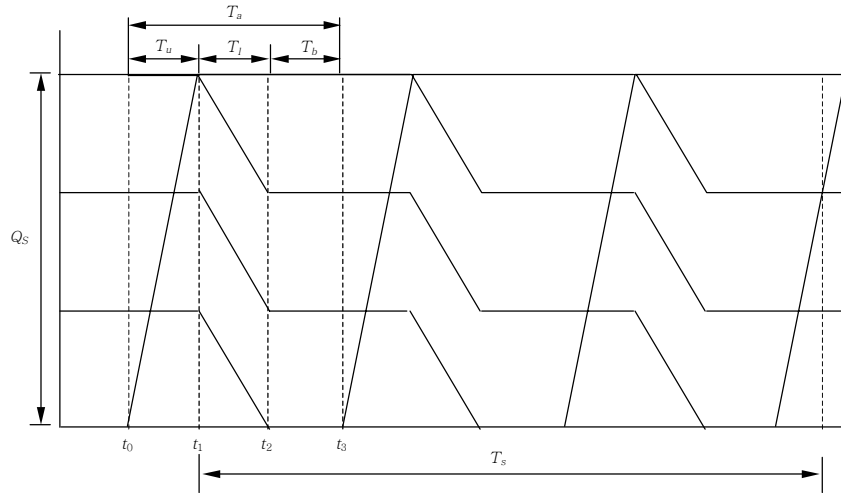


4. 환적화물에 따른 재고량 변화

환적화물은 다른 선박에서 내려진 화물을 싣는 환적 적하화물과 다른 선박이 실어 나갈 수 있도록 선박에서 내리는 환적 양하화물로 구분된다. 일반 수출입화물과 동일하게 선박은 양하작업 시간동안 일반 수입화물과 함께 환적 양하화물을 먼저 처리하고 적하작업 시간동안에 일반 수출화물과 같이 환적 적하화물을 처리한다.

〈그림-6〉은 컨테이너터미널 장치장에서 환적화물에 따른 재고량 변화를 보여준다. 환적 양하화물은 양하작업 시간동안 선박으로부터 장치장에 내려진 후 환적화물의 장치허용기간인 T_s 동안에 입항하는 선박들의 환적 적하물량으로 장치장에서 빠져나간다. 본 연구에서는 선박에서 내려져 그 배에 다시 실려지는 화물은 배제하였으므로 환적 양하화물은 반드시 후행 입항선박의 환적 적하화물의 역할만 수행하게 된다. 사이클 기간동안 환적화물을 싣는 선박수 p 는 $\lfloor T_s/T_a \rfloor$ 이며 〈그림-6〉에서와 같이 기준 선박에 적하되는 환적화물과 관련된 선박수는 p 와 일치한다.

〈그림-6〉 선박 입출항에 따른 환적화물의 재고량 변화



장치허용기간 내의 마지막 선박에 환적 적하작업이 종료되면 해당 선박의 환적 양하물량은 0이 된다. 이때 환적 양하물량은 환적 적하물량을 적하하는 선박의 적하작업 시작시점까지는 변동이 없다. 장치장에서 환적 컨테이너 화물 재고량 $S(t)$ 는 기준 선박의 환적화물을 기준으로 보면 $t_0 \leq t < t_1$ 기간동안에는 양하작업이 발생하여 재고량이 증가하고 $t_1 \leq t < t_2$ 기간에서는 재고량 변동이 발생하지 않는다. 그렇지만 $t_1 \leq t < t_2$ 기간동안 선행 선박의 환적화물들은 기준 선박에 대해 적하작업이 발생하여 감소하게 된다. $t_0 \leq t < t_1$ 와 $t_2 \leq t < t_3$ 의 구간에서는 선행 선박의 환적화물에 있어 재고량 변동은 발생하지 않는다. 따라서 환적 컨테이너 재고량 $S(t)$ 는 시점 t 의 구간에 따라 식 (27)~(29)와 같이 유도된다.

$t_0 \leq t < t_1$ 인 경우에

$$S(t) = \frac{Q_s}{T_u} t + \sum_{k=1}^p \frac{p+1-k}{p} Q_s = \frac{Q_s}{T_u} t + \frac{p+1}{2} Q_s \dots\dots\dots(27)$$

$t_1 \leq t < t_2$ 인 경우에

$$S(t) = Q_S + \sum_{k=1}^p \left(-\frac{Q_S}{pT_l}(t-t_1) + \frac{p-k+1}{p} Q_S \right) = \frac{p+3}{2} Q_S - \frac{Q_S}{T_l}(t-t_1) \dots\dots\dots(28)$$

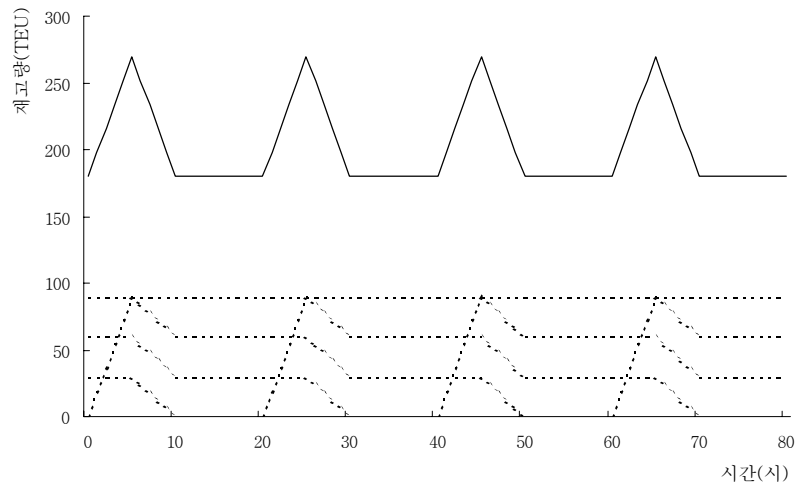
$t_2 \leq t < t_3$ 인 경우에

$$S(t) = \sum_{k=1}^p \frac{p-k+1}{p} Q_S = \frac{p+1}{2} Q_S \dots\dots\dots(29)$$

식(27)~(29)를 정리하면 $S(t)$ 는 $t_0 < t \leq t_1$ 에서 단조증가이고, $t_1 < t \leq t_2$ 에서는 단조감소이며, $S(t_0) = S(t_2) = S(t_3)$ 이다. 따라서 사이클 내에서의 최소 재고량은 t_0, t_2, t_3 에서 그리고 최대 재고량은 t_1 에서 발생한다.

예를 들어 $Q_S = 90$, $T_u = T_l = 5$ 시간, $T_a = 20$ 시간, 그리고 $T_s = 70$ 시간이라고 가정하면 $p = 3$ 로 식(27)~(29)를 이용하여 장치장의 재고를 추정한 결과를 <그림-7>에 표시하였다. 그림에서 점선으로 표시된 선은 선박별 재고량을 의미하고 실선은 환적화물 전체 재고량의 변화를 보여준다.

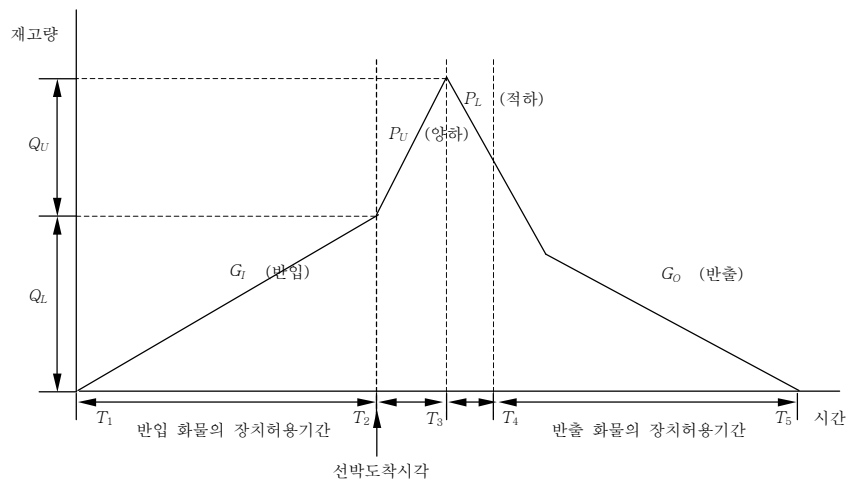
<그림-7> 환적화물의 재고량 추정



5. 수치모형을 이용한 재고량 분석

앞에서 하물종류에 따라 각각의 재고량 변화를 살펴보았다. 여기서는 재고량 변화를 단위 항차단위로 살펴본다. 앞에서 살펴본 바와 같이 선박이 도착하는 시점을 기준으로 선박도착간격, 선박별 작업량 및 선박 도착시점을 전후로 한 컨테이너 반출입률에 따라 화물별 재고량은 달라지기 때문에, 이를 항차기준으로 표현하면 <그림-8>과 같이 재고량이 변함을 알 수 있다.

<그림-8> 단위 항차에 의한 재고량 변화



즉 선박도착시점 T_2 를 기준으로 적하량 Q_L 은 장치허용기간을 고려하여 시점 T_1 에서부터 반입이 시작되고, 선박이 안벽에 접안한 T_2 시점부터 $T_3 - T_2$ 시간동안 양하량 Q_U 가 양하된다. 양하가 완료된 T_3 시점부터 $T_4 - T_3$ 시간동안 적하량 Q_L 이 적하된다. 해당 선박에 대한 양적하작업이 완료된 시점 T_4 부터 양하량 Q_U 의 반출이 시작된다. 이와 같이 단위 항차단위로 재고량의 집중화를 분석할 수 있다. 그리고 위와

같은 항차단위의 재고량 변화를 모든 항차에 대하여 고려함으로써 결국 장치장에서의 재고량 변화를 분석할 수 있다.

위와 같은 재고모형에 의하여 장치재고량을 분석함으로써, 컨테이너 터미널의 설계과정에서 주어진 연간 물동량을 취급할 수 있는 소요공간을 분석할 수 있다. 또한 운영 측면에서 화물별 장치허용일수나 하역작업 생산성이 장치장의 보관능력에 어떠한 영향을 미치는지 예측할 수 있다. 기존의 정적모형에서는 회전율의 개념을 사용해 장치장에서의 평균 재고량에 기존 터미널의 실적 분석을 통해 구한 피크계수를 곱하여 소요 재고량을 구하였다. 그렇지만 본 연구에서는 평균 재고량뿐만 아니라 선박 입출항에 따른 최대 재고량을 같이 구할 수 있으므로 피크계수를 사용하는 경우와 비교하여 화물 집중도의 효과를 보다 합리적으로 표현할 수 있다고 판단된다.

그러나 수치모형에서 구해지는 평균 재고량 또는 최대 재고량이 장치장의 소요공간을 직접 의미하지는 않는다. 터미널 운영의 효율성과 작업의 불확실성 등의 요인으로 실제 소요공간과는 차이가 있다. 즉 최대 재고량은 화물이 집중되는 일시적인 현상을 나타내므로 이를 곧바로 설계기준으로 할 경우 과도한 소요공간이 설정될 가능성이 높기 때문에 최대 재고량뿐만 아니라 최대 재고량의 시간 점유비율 등을 고려하여 장치장 소요 규모를 결정하여야 할 것이다.

V. 수치실험

본 절에서는 수치예제를 통해 기존 방법과 본 연구의 재고모형을 비교하고 변동 요인의 변화에 따른 민감도 분석 결과를 제시하고자 한다. 먼저 연간 물동량이 주어졌을 때 회전율을 이용한 기존 방법에 적용되는 조건을 본 연구의 수치모형에서 고려하는 변동요인으로 변환해야 한다. 따라서 연간 물동량이 Q 라고 가정할 때 선박당 평균 작업량이 Q_V 이면 선박당 도착간격시간은 $\frac{365Q_V}{Q}$ 일이 된다. 환적화물의 경우에는

환적 양하와 환적 적하를 포함하므로 환적 화물에 대한 재고모형에서는 선박당 평균 작업량 Q_V 는 $2Q_S$ 로 계산된다. 그리고 반출입물이 일정하다고 가정하였으므로 평균 장치기간은 장치허용기간의 절반이 된다.

재고모형의 비교를 위해 소요 TGS를 구하는 UNCTAD의 모델에서 피크계수를 고려하지 않은 평균 재고량을 기존 방법으로 정하였다. 이는 식(30)과 같이 정의되는데, 여기서는 평균 장치일수 대신에 장치허용기간을 사용하였고 운영시간은 1년으로 설정하였다.

$$\frac{\text{연간 물동량} \times \text{장치허용기간(시)}}{365 \times 24 \times 2} \dots\dots\dots(30)$$

입항 선박의 체류시간은 선박의 작업량이 많아지면 증가되고 적으면 감소하는 경향이 있지만 입항 선박에 대한 서비스 수준을 일정하게 유지할 수 있도록 안벽의 소요 자원이 지원된다고 가정하여 양적하작업에서의 소요시간을 일정하게 두고 재고량을 분석하였다.⁷⁾ 기존 모형에서 적정 소요 재고량을 산출하기 위해서는 피크계수가 적용되어야 하지만 본 연구에서는 피크계수를 고려하지 않은 평균 재고량과 수리모형에서 구한 최대 재고량을 비교하였다.

<표-1>은 일반 수출화물에 대해 연간물동량과 장치허용기간을 변화시켰을 때 회전율 개념을 이용하여 구한 평균 재고량을 정리한 것이다. 식(30)에서 의미하듯이 연간 물동량과 장치허용일수는 평균 재고량에 선형관계를 지니고 있다. 장치허용일수가 3일일 때 연간 물동량이 20만 TEU의 경우 평균 재고량은 822TEU이지만 연간 물동량이 40만TEU로 100% 증가하면 평균 재고량도 역시 1,644TEU로 100% 증가하였다. 장치허용기간도 평균 재고량에 대해 동일한 영향을 미친다.

7) 선박의 운행 스케줄을 유지시키기 위해서는 항만에서의 재항시간을 일정해지도록 하는 것이 중요하다. 따라서 선박규모가 증가하면 투입 하역 장비의 수를 증가시키거나 하역 장비의 성능을 향상시켜 처리 능력을 높이게 된다. Kevin Cuilliance and Mahim Khanna, "Economies of Scales in Large Container Ship", *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 33, 1999.

〈표-1〉

기존 모형의 평균 재고량

단위: TEU

연간 물동량 장치허용일수	20만TEU	30만TEU	40만TEU	50만TEU
3	822	1,233	1,644	2,055
4	1,096	1,644	2,192	2,740
5	1,370	2,055	2,740	3,425
6	1,644	2,466	3,288	4,110
7	1,918	2,877	3,836	4,795

〈표-2〉에서는 양적하작업 시간을 각각 6시간으로 가정하고 재고모형을 이용하여 최대 재고량을 구하였다. 〈표-2〉는 일반 수출화물에 대해 식(15)~(26)를 적용하여 구한 최대 재고량이다. 동일한 조건에서 최대 재고량은 피크계수가 고려되지 않은 〈표-1〉의 평균 재고량에 비해서는 당연히 큰 값을 나타낸다. 연간 물동량과 장치허용일수, 선박당 평균 작업량이 늘어나면 최대 재고량도 증가하지만 요인에 따라 변동폭은 차이가 있다. 선박당 평균 작업량이 증가할수록 연간 물동량에 따른 최대 재고량의 변동폭이 커졌다. 기존 모형에서는 고려되지 않은 선박당 평균 작업량의 변동이 재고모형에서는 영향을 미친다. 연간 물동량이 20만TEU이고 장치허용일수가 3일이라고 가정할 때 선박 평균 작업량이 1,000TEU에서 1,200TEU로 증가하면 최대 재고량은 10.1%의 상승효과가 있었다. 이는 선박당 평균 작업량이 커질수록 일시적인 화물의 하역작업에 의해 재고량이 증가하는 것으로 해석된다. 또한 기존 모형에서 재고량과 선형관계를 가졌던 장치허용일수와 연간 물동량이 재고모형에서는 다른 변동 요인들과의 관계를 가져서 비선형적 관계로 바뀌었음을 알 수 있다.

〈표-2〉 수리모형을 이용한 일반 수입화물의 최대 재고량

단위: TEU

선박당 평균 작업량	연간 물동량 장치허용일수		20만 TEU	30만 TEU	40만 TEU	50만 TEU
1,000 TEU	3		1,475	1,950	2,425	2,900
	4		1,756	2,363	2,969	3,575
	5		2,005	2,766	3,513	4,262
	6		2,300	3,167	4,056	4,953
	7		2,543	3,571	4,600	5,629
1,200 TEU	3		1,624	2,048	2,486	2,997
	4		1,818	2,436	3,054	3,672
	5		2,143	2,878	3,612	4,346
	6		2,386	3,280	4,165	5,044
	7		2,676	3,669	4,715	5,737
1,400 TEU	3		1,724	2,121	2,645	3,088
	4		1,993	2,587	3,180	3,773
	5		2,194	2,948	3,703	4,458
	6		2,528	3,390	4,253	5,142
	7		2,767	3,793	4,818	5,827
1,600 TEU	3		1,776	2,295	2,730	3,198
	4		2,132	2,664	3,248	3,897
	5		2,346	3,091	3,836	4,582
	6		2,597	3,485	4,373	5,261
	7		2,912	3,902	4,891	5,936
1,800 TEU	3		1,800	2,436	2,765	3,335
	4		2,234	2,727	3,407	3,990
	5		2,507	3,215	3,922	4,632
	6		2,690	3,579	4,469	5,358
	7		2,994	4,014	5,034	6,053

또한 기존 방법과의 차이점을 비교하기 위해 <표-3>에서는 평균 재고량에 대해 최대 재고량의 상대적 비율을 정리하였다. 수리모형에서

구해지는 최대 재고량은 장치허용일수에 비해 연간 물동량의 영향이 적다는 점을 알 수 있다. 선박당 평균 작업량의 경우에 최대 재고량의 증가에 미치는 증가분은 적지만 선박당 작업량이 증가하게 되면 일시적인 화물 집중화에 따라 최대 증가량은 증가함을 보여준다. 즉, 연간 물동량은 적을수록, 선박당 평균 작업량은 클수록 그리고 장치허용일수는 짧을수록 두 방법간의 차이는 커진다. 이는 각 선박의 화물들간의 중복기간이 짧을수록 일시적인 화물 증가에 의한 영향이 많다는 점을 의미한다.

일반 수출입화물에 대해 연간취급물동량이 40만TEU, 선박의 평균 작업량이 1,400TEU, 그리고 장치허용기간이 5일이라고 가정하고 양적하작업 시간을 변화시켰을 때의 최대 재고량을 <표-4>와 <표-5>에 정리하였다. 일반 수입화물은 적하작업 시간에 그리고 일반 수출화물은 양하작업 시간에 관련됨을 알 수 있다. 식(29)에서 보듯이 환적화물의 경우에는 양적하작업 시간이 최대 재고량과 관련이 없었다. 이는 환적화물의 경우 장치장으로부터 선박에 실려지는 환적 적하작업과 선박으로부터 장치장에 내려지는 환적 양하작업이 겹치는 경우가 발생하지 않기 때문이다.

결과적으로 터미널 내의 총 재고량은 지금까지 다루어온 일반 수출, 일반 수입 그리고 환적화물의 재고량을 합하여 산출할 수 있다. <그림-9>는 4절에서 예시한 각 화물별 재고량(<그림-5>~<그림-7>)을 합산하여 산출한 전체 재고량을 나타내고 있다. 선박의 양하작업 완료시점에 최대 재고량이 발생하지만 선박의 양적하작업이 수행되지 않는 기간 동안에는 일반 수입화물과 일반 수출화물의 재고량이 합해져서 일정한 재고량을 유지하고 있음을 보여준다.

〈표-3〉 평균 재고량 대비 최대 재고량의 증가비율

단위: %

선박당 평균 작업량	연간 물동량 장치허용일수		20만 TEU	30만 TEU	40만 TEU	50만 TEU
1,000 TEU	3		79.4	58.2	47.5	41.1
	4		60.2	43.7	35.4	30.5
	5		46.4	34.6	28.2	24.4
	6		39.9	28.4	23.4	20.5
	7		32.6	24.1	19.9	17.4
1,200 TEU	3		97.6	66.1	51.2	45.8
	4		65.9	48.2	39.3	34.0
	5		56.4	40.0	31.8	26.9
	6		45.1	33.0	26.7	22.7
	7		39.5	27.5	22.9	19.6
1,400 TEU	3		109.7	72.0	60.9	50.3
	4		81.8	57.4	45.1	37.7
	5		60.1	43.5	35.1	30.2
	6		53.8	37.5	29.3	25.1
	7		44.3	31.8	25.6	21.5
1,600 TEU	3		116.1	86.1	66.1	55.6
	4		94.5	62.0	48.2	42.2
	5		71.2	50.4	40.0	33.8
	6		58.0	41.3	33.0	28.0
	7		51.8	35.6	27.5	23.8
1,800 TEU	3		119.0	97.6	68.2	62.3
	4		103.8	65.9	55.4	45.6
	5		83.0	56.4	43.1	35.2
	6		63.6	45.1	35.9	30.4
	7		56.1	39.5	31.2	26.2

〈표-4〉 양적하작업 시간 변화에 따른 일반 수입화물의 실험결과

단위 : TEU

양하작업 시간(시) 적하작업 시간(시)	4	6	8	10	12
4	3,610	3,610	3,610	3,610	3,610
6	3,703	3,703	3,703	3,703	3,703
8	3,796	3,796	3,796	3,796	3,796
10	3,890	3,890	3,890	3,890	3,890
12	3,983	3,983	3,983	3,983	3,983

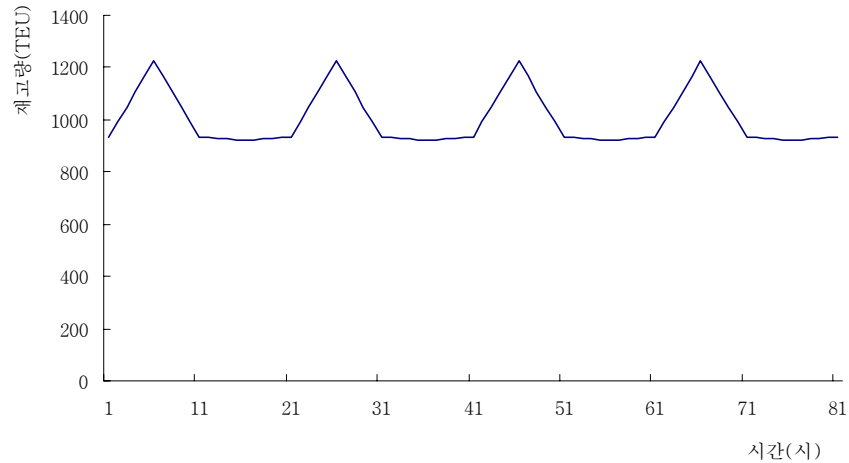
〈표-5〉 양적하작업 시간 변화에 따른 일반 수출화물의 실험결과

단위 : TEU

양하작업 시간(시) 적하작업 시간(시)	4	6	8	10	12
4	3,610	3,703	3,796	3,890	3,983
6	3,610	3,703	3,796	3,890	3,983
8	3,610	3,703	3,796	3,890	3,983
10	3,610	3,703	3,796	3,890	3,983
12	3,610	3,703	3,796	3,890	3,983

그러나 현실적으로 장치장 운영전략에 따라 장치장을 일반 수출입 화물과 환적화물로 구별할 수 있기 때문에, 소요 장치장 규모 산정은 위와 같은 장치 재고량뿐만 아니라 작업 생산성 등을 고려하여야 한다. 즉 반입을 위한 할당공간(reserved space)이나 반출작업에 따른 낭비공간(broken space) 등 작업 생산성을 고려한 운영여유 등을 감안하여 실질적인 소요 재고량 규모가 파악되어야 한다.

〈그림-9〉 터미널의 재고량 변화



VI. 결론 및 추후연구

지금까지 장치장 재고량에 대한 연구들에서는 화물의 회전율에 따른 평균 재고량에 피크계수를 고려하여 소요 재고량을 산정하거나 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션 방법을 주로 이용하였다. 그렇지만, 전자는 터미널 계획시에 중요하게 고려되는 입항 예정선박과 터미널의 처리 능력과 관련된 특성들을 구체적으로 포함하지 못할 뿐만 아니라 선박의 입출항에 따라 발생하는 화물의 집중화를 합리적으로 설명하지 못하였다. 그리고 후자는 시뮬레이션 모델을 구현하기가 힘들고 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서는 많은 비용과 시간을 소요해야 하는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 컨테이너터미널 설계단계에서 장치장 소요공간의 추정에 필요한 개선된 재고량 분석 모형을 제안한다. 장치장 재고량과 밀접한 관련을 맺는 변동요인에는 선박의 도착간격시간, 선박의 작업량, 양적하작업 생산성 그리고 장치허용기간이 있다. 재고량 분석에

서는 화물의 작업흐름을 고려하여 일반 수입화물, 일반 수출화물 그리고 환적화물로 구분하여 각각에 대한 수치모형을 제시하였다.

선박 도착간격시간, 장치허용기간, 선박의 평균 작업량 그리고 작업 생산성을 변화시키면서 최대 재고량의 민감도 분석을 수행하였다. 그리고 기존 방법에서 사용되는 평균 재고량과 수리모형의 최대 재고량에 대한 비교 실험을 하였다. 평균 재고량의 경우 연간 물동량과 장치허용 일수에 정비례 관계를 가지지만 수리모형에서는 증감하는 정도에 차이가 있었다. 수리모형에서 장치허용기간이 연간 물동량, 선박당 평균 작업량, 양적하작업 시간에 비해 최대 재고량에 가장 많은 영향을 미쳤다. 또한 기존의 방법에서 고려한 피크계수는 선박도착간격을 줄인다는지 또는 선박별 작업량을 증가하는 방법으로 재고모형에서도 어느 정도는 반영할 수 있다.

제안된 방법은 도착간격시간, 선박당 작업량, 작업 생산성 등을 고정 시킴으로써 확률적인 변동에 의해 발생될 수 있는 화물량의 집중을 고려하지는 못하였다. 따라서 동적인 상황에 따른 우발적인 요인을 반영할 수 있는 확률적 모형에 대한 연구가 필요하다. 또한 장치장의 소요 공간을 산정할 때에는 화물 재고량 외에도 장치장 운영에서 발생하는 장치전략이나 운영여유 등이 많은 영향을 미친다. 따라서 보다 상세한 분석을 위해서는 이들을 고려할 수 있는 확장된 모델의 개발이 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 강종희 외, 「21세기 글로벌 해운·물류」, 한국해양수산개발원, 2000. 11.
2. 김홍배, 「컨테이너 터미널의 수입 장치장 운영정책」(박사학위 논문), 부산대학교, 1999.
3. Chung, Y. G., Randhawa, S. U. and McDowell, E. D., *A Simulation Analysis for a Transstainer-based Container Handling Facility*, Computers ind. Engng., Vol.14, No.2, 1988.
4. Elizabeth, G. J., *Managing Containers Marine Terminals: An Application of Intelligent Transportation Systems Technology to Intermodal Freight Transportation*(Ph. D Dissertation), The University of Texas at Austin, 1996.
5. Frankel, E. G., *Port Planning and Development*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1987.
6. Jansson, J. O, and D. Shneerson, *Port Economics*, The MIT Press, 1982.
7. Roux, E. D., *Storage for Import Containers at Seaports*(Ph. D Dissertation), University of California at Berkeley, 1996.
8. Sauerbier, C. L. and R. J. Meurn, *Marine Cargo Operation*, John Willey & Sons, 2nd ed., 1985.
9. Silberholz, M. B., B. L. Golden and E. K. Baker, *Using Simulation to Study the Impact of Work Rules on Productivity at Marine Container Terminals*, Computers Ops. Res., Vol.18, No.5, 1991.
10. Taleb-Ibrahimi, M., *Modeling and Analysis of Container Storage in Port*(Ph. D Dissertation), University of California at Berkeley, 1989.
11. Tongzon, J. L., *Determinants of Port Performance and Efficiency*, Transpn. Res.-A, Vol.29A, No.3, 1995.
12. UNCTAD, *Berth Throughput*, United Nations, 1973.
13. ———, *Port Development*, United Nations, 2nd ed., 1985.