

# 완충지역을 활용한 타부두 환적 컨테이너 운송 모형의 복화율 개선 효과 분석

박형준\* · † 신재영

\*한국해양대학교 물류학 박사, † 한국해양대학교 물류시스템학과 교수

## An Improvement of Backhaul Transport with the Mathematical Model of Inter-Terminal Transportation Using Buffer Space

*Hyoung-Jun Park\* · † Jae-Young Shin*

*\*PhD, Department of Logistics Engineering, National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea*

*† Professor, Department of Logistics Engineering, National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea*

**요 약** : 부산항은 다수 터미널 운영사에 의해 분리 운영되고 있어 ITT(Inter-Terminal Transportation) 물량이 다수 발생한다. ITT 물량 발생은 추가 운송비용, 공차운송, 차량 대기 및 터미널 혼잡 등 다양한 문제를 초래해 부산항 경쟁력을 약화시키고 있다. 그 중 공차운송 문제는 부산항 ITT 운영에 있어서 비용 문제를 악화시키는 대표적인 요인이지만 부산항의 ITT 복화율은 낮은 수준에 머물고 있다. 부산항 환적 경쟁력 강화를 위해서는 ITT 복화율을 높일 수 있는 방안이 필요하다. 따라서 본 연구는 ITT의 복화율 개선을 위해 완충지역을 활용한 복화운송 최대화 수리모형을 제시하였다. 그리고 실제 운영 데이터에 기반한 실험을 통해 완충지역 활용에 따른 복화율 개선 효과를 분석하였다.

**핵심용어** : 타부두 환적, 완충지역, 복화운송, 대기시간, 교통 혼잡, 혼합정수계획법, 부산 신항

**Abstract** : Busan Port is operated separately by a number of terminal operators, resulting in a large number of ITT (Inter-Terminal Transportation) volumes. The occurrence of ITT volume causes various problems such as additional transportation cost, empty truck trips, truck delays and terminal congestion, weakening Busan Port's competitiveness. Among them, the empty truck trip problem is a representative factor, that exacerbates the cost problem of the ITT operation at Busan Port. But the ITT backhaul rate at Busan Port remains low. To strengthen the transhipment competitiveness of Busan Port, it is necessary to increase the ITT backhaul rate. In this paper, to improve ITT backhaul rate, we present a mathematical model for maximizing backhaul transport using buffer space. And we analyzed the improving effects of backhaul transport using buffer space through experiments based on actual operating data.

**Key words** : Inter-Terminal Transportation(ITT), buffer space, backhaul transport, delay time, traffic congestion, mixed integer programming(MIP), Busan New Port

### 1. 서 론

전 세계적인 물동량 증가 추세에 따라 글로벌 항만들의 환적 경쟁력의 중요성도 커지고 있다. 환적은 동일 세관구역 안에서 입항하는 운송 수단에서 출항하는 운송수단으로 물품을 옮겨 싣는 것을 말하며, 항만분야에서는 선박에서 다른 선박으로 화물을 옮겨 싣는 것을 의미한다. 이 중에서도 타부두 환적 운송은 환적의 종류 중 하나로 입항과 출항 터미널이 다른 환적을 의미한다. 타부두 환적은 선박에서 화물 하역 후 다른 선박에서 적하 및 출항이 이루어지는 2번의 작업이 필요하며, 터미널 간의 운송이 추가되기 때문에 항만 운영 비효율에 영향이 크다.

부산항의 경우 다수 터미널 운영사에 의해 분리 운영되고 있어 ITT(Inter-Terminal Transportation) 물량이 다수 발생한다. ITT 물량 발생은 추가 운송비용, 공차운송, 차량 대기 및 터미널 혼잡 등 다양한 문제를 초래해 부산항의 환적 경쟁력을 약화시키고 있다. 그 중 공차운송은 ITT 운영에 있어서 비용 문제를 악화시키는 대표적인 요인이지만 현재 부산항의 ITT 복화율은 약 20%로 낮은 수준에 머물고 있다(Park, 2019).

이에 본 연구에서는 ITT 복화율 개선을 위한 대안으로 추가 장치장의 역할을 할 수 있는 완충지역을 활용한 ITT 방식을 제안하였다. 해당 방식에서 복화운송이 증가하면 운송비, 교통 체증, 터미널 혼잡 등이 줄어 운영 효율이 높아지게 되

† Corresponding author : 종신회원, shinjy@kmou.ac.kr 051)410-4335

\* 정회원, phj5504@kmou.ac.kr 051)410-4931

만, 지나치게 복화운송에 집중한 배차가 이루어지면 오히려 차량 대기시간이 증가할 수 있다. 따라서 이러한 특성을 반영하여 우선적으로 복화운송을 최대화하되, 차량 대기시간이 증가하는 비효율을 최소화할 수 있는 혼합정수계획모형을 제시하였다. 그리고 실제 운영 데이터에 기반한 실험을 통해 완충지역 활용에 따른 복화율 개선 효과를 분석하였다.

## 2. 선행연구 고찰

ITT는 항만 내에서 조직적으로 분리된 영역 간에 컨테이너와 화물을 이동하는 모든 유형의 육상 및 해상 운송을 의미한다(Heilig and Voss, 2016). 부산항의 경우 다수 터미널 운영사에 의해 분리 운영되고 있으며, 내부 통로가 제한적으로 개방되어있기 때문에 통상적으로는 Y/T(Yard Truck)보다는 외부 통로로 이동하는 외부 트럭에 의한 운송을 ITT로 부르고 있다.

BPA(Busan Port Authority)는 시간대별 반출입 차량 불균형 문제 해소를 위해 VBS(Vehicle Booking System) 도입을 추진 중이며, ITT 관련 주체들 간 정보 공유 부재에 대한 해결 방안으로 블록체인 기반 ITT 운송시스템을 구축 및 운영 중이다. 이처럼 ITT 운영 효율화를 위한 ITT 시스템 구축 및 개선 필요에 따라 다양한 연구가 진행되었다. 관련 연구로 KRRI(2013), Oh et al.(2014)는 국내 ITT 물량의 효율적인 처리를 위해 다양한 대안별 시스템 소요량 및 비용에 대해 경제적, 재무적 타당성 분석을 실시하여 부산신항 ITT의 효율적 처리를 위한 유력대안을 제시하였다. 또한, Park and Lee(2017), Baek(2017), Park(2017)은 ITT 시스템 및 플랫폼 필요성을 주장하였으며, ITT 플랫폼 비즈니스를 설계하고 효과분석을 진행하여 ITT 문제 해결과 효율적 운영 가능성을 검증하였다. Jo et al.(2020)는 화물 및 터미널 보안 및 사고 예방 방지에 초점을 두어 ITT 운송수단의 우선순위를 도출하였다.

또한, Lee et al.(2012), Nieuwkoop et al.(2014), Tierney et al.(2014), Kim and Kim(2015), Heilig et al.(2017), Hu et al.(2016), Park(2017), Jin and Kim(2018), Hu et al.(2018)은 ITT 트럭 라우팅문제에 대해 타임 스페이스 개념을 적용한 최적화 접근 방식을 제공하였으며, 수리적 모형을 구축하고 평가하였다. Schroer et al.(2014), Gharehgozli et al.(2016), Mishra et al.(2016), Park and Kim(2016)은 로테르담 항만을 대상으로 실제 터미널 운영 데이터를 반영한 시뮬레이션 분석을 통해 ITT 시스템을 모델링하고 평가하였다.

Adi et al.(2020)은 심층 강화학습을 통해 ITT 문제에 있어 트럭 운송사들 간의 트럭 경로 문제를 최적화하는 방법을 제시하였고, 시뮬레이티드 어닐링, 타부서치 알고리즘의 분석 결과를 비교하여 개선 효과를 보였다.

Park et al.(2021)은 차량 대기시간 최소화를 목적으로 완충

지역을 활용한 ITT 차량 스케줄링 모형을 제시하였으며, 터미널 운영 상에 발생할 수 있는 다양한 상황을 가정하여 완충지역 활용 효과를 분석하였다.

Park(2022)은 단일 완충지역 활용 방식과 다수 완충지역 활용 방식에 대해 수리 모형화하고 다양한 운영 상황에 대한 비교 분석을 통해 상황별 적합한 완충지역 활용 방식을 평가하였다.

관련 연구들은 ITT 문제 해결을 위해 시스템 구축을 통한 효율화, 수리 모형화를 통한 최적화 분석, 시뮬레이션 모델링과 분석, 최근에는 인공지능 강화학습을 적용한 분석까지 다양한 분야로 연구가 진행되었다. 대부분의 연구들은 차량 대기시간 최소화, 차량 도착 지연에 따른 페널티 최소화, 운송에 따른 이익 최대화 등을 목적으로 하였다.

본 연구는 복화운송 최대화를 고려함으로써 Park et al.(2021)의 연구에서 제시한 완충지역을 활용한 ITT 배차 모형을 발전시켰다. 또한 복화운송 최대화와 대기시간 최소화의 상충관계에 따라 복화운송 최대화 우선 모형, 대기시간 최소화 우선 모형 두 가지 방식을 비교하고 ITT 비효율 개선을 위해 적합한 방식을 검토하였다는 점, 완충지역 활용에 따른 복화운송과 대기시간 개선 효과를 검토하여 적절한 완충지역 규모를 제시하였다는 점에서 차별성이 존재한다.

## 3. 수리적 모형

### 3.1 문제 설정 및 가정

본 연구에서 고려하는 완충지역은 ITT 배차계획 시 과도하게 물리는 작업이 존재할 경우 ITT 컨테이너를 비교적 단기 간 수용하는 부두 인근 임시 장치장을 의미한다(Park, 2022).

완충지역을 활용하여 ITT가 이루어지는 경우 1차, 2차로 이루어진 완충지역 활용 ITT 방식과 반출터미널에서 반입터미널로 바로 운송되는 일반적인 ITT 방식의 2가지 운송 방식으로 구분된다. 1차 운송은 반출터미널에서 상차한 컨테이너를 완충지역에 하차하는 운송이다. 2차 운송은 완충지역에서 상차한 컨테이너를 반입터미널에 하차하는 운송이다. 반출터미널에서 반입터미널로 바로 운송되는 형태는 기존의 ITT와 동일한 운송 절차를 가진다(Park, 2022).

본 논문에서는 완충지역을 고려한 ITT 문제를 다룬다. 반출입 터미널의 작업 수용량을 고려하고, 가용자원을 넘어서 차량 대기가 발생하는 작업의 경우 터미널 인근 완충지역을 이용하도록 한다. ITT 작업을 완료한 차량은 해당 터미널에서 다른 터미널로 ITT 물량이 존재하는 경우 복화운송을 하도록 한다. 해당 문제는 ITT 최적 스케줄링을 위해 복화운송 최대화 및 차량 대기시간 최소화를 목적으로 하는 다중목적함수 최적화 문제이다.

모형 수립을 위해 다음과 같이 가정한다.

- 각 터미널은 시간대별로 처리 가능한 컨테이너 반출입 물량을 가진다.
- 완충지역은 시간대별로 컨테이너 보관 가능량을 가진다.
- 운송사는 시간대별로 차량 운행을 원하는 운행 희망 최대 차량 대수를 가진다.
- 차량은 한 번에 한 개의 컨테이너만 운송한다.
- 반출터미널에서 차량이 출발하기 위해서는 해당 시간대에서 차량 가용량, 반출터미널 가용량에 여유가 있어야 한다.
- 반입 터미널의 처리 가용량을 넘어서면 완충지역의 여유량이 있는 경우 완충지역에 보관된다. 만약 완충지역도 여유량이 없는 경우는 반입 터미널에서 대기한다.

### 3.2 수리 모형

본 모형에서는 복화운송을 최대화하고 차량 대기시간을 최소화하는 최적해를 찾고자 한다. 앞선 문제 설정 및 가정을 바탕으로 모형화한다.

#### parameter

- $m$  : 반출터미널 index
- $n$  : 반입터미널 index
- $T$  : 터미널 집합
- $i$  : 반출 시간대 index
- $j$  : 반입 시간대 index
- $k$  : 완충지역 작업 시간대 index
- $S$  : 시간대 집합
- $CA_{mi}$  : 터미널  $m$  의 시간대  $i$  에서 처리가능한 반출입 물량
- $TC_i$  : 시간대  $i$  에 운행 희망 최대 차량 대수
- $BH_{nj}$  : 시간대  $j$  에 터미널  $n$  에서 복화운송 횟수
- $BC$  : 완충지역의 보관 가능량
- $t_{minj}$  : 시간대  $i$  에 터미널  $m$  에서 반출되어 시간대  $j$  에 터미널  $n$  에 반입될 때까지 소요 시간
- $W$  : 총 작업량
- $W_{mn}$  : 터미널  $m$  에서 터미널  $n$  으로 운송해야하는 물량

#### variables

- $x_{minj}$  : 시간대  $i$  에 터미널  $m$  에서 반출하여 시간대  $j$  에 터미널  $n$  에 반입되는 물량
- $xb_{minj}$  : 시간대  $i$  에 터미널  $m$  에서 반출하여 완충지역으로 운송한 후 시간대  $j$  에 완충지역에서 터미널  $n$  으로 반입되는 물량
- $y_{mi}$  : 시간대  $i$  에 터미널  $m$  의 반출량
- $z_{nj}$  : 시간대  $j$  에 터미널  $n$  으로의 반입량
- $b_k$  : 시간대  $k$  에 완충지역의 보관량

#### Mathematical Model

$$\text{Maximize } f_{bh} = \sum_{n \in T} \sum_{j \in S} BH_{nj} \quad (1)$$

$$\text{Minimize } f_{dt} = \sum_{m \in T} \sum_{i \in S} \sum_{n \in T} \sum_{j \in S} \sum_{j > i} t_{minj} x_{minj} \quad (2)$$

subject to

$$\sum_{m \in T} \sum_{i \in S} y_{mi} \leq W \quad (3)$$

$$\sum_{n \in T} \sum_{j \in S} \sum_{j > i} x_{minj} + \sum_{n \in T} \sum_{j \in S} \sum_{j > i} xb_{minj} = y_{mi} \quad \forall m \in T, \forall i \in S \quad (4)$$

$$\sum_{m \in T} \sum_{i \in S} \sum_{j \geq i} x_{minj} + \sum_{m \in T} \sum_{i \in S} \sum_{j > i} xb_{minj} = z_{nj} \quad \forall n \in T, \forall j \in S \quad (5)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} (x_{minj} + xb_{minj}) \leq W_{mn} \quad \forall m, n \in T \quad (6)$$

$$y_{mi} + z_{mi} \leq CA_{mi} \quad \forall m \in T, \forall i \in S \quad (7)$$

$$\sum_{m \in T} \sum_{i \in S} y_{mi} = \sum_{n \in T} \sum_{j \in S} z_{nj} \quad (8)$$

$$\sum_{m \in T} \sum_{n \in T} \sum_{j \in S} (x_{minj} + xb_{minj}) \leq TC_i \quad \forall i \in S \quad (9)$$

$$\text{Min} \left( \begin{array}{l} \sum_{m \in T} \sum_{i \in S} (x_{minj} + xb_{minj}), \\ \sum_{m \in T} \sum_{i \in S} (x_{n(j+1)mi} + xb_{n(j+1)mi}) \end{array} \right) = BH_{nj} \quad \forall n \in T, \forall j \in S, j > 1 \quad (10)$$

$$BH_{n1} = 0 \quad \forall n \in T \quad (11)$$

$$b_k = b_{k-1} + \sum_{m \in T} \sum_{n \in T} (xb_{mknj} - xb_{mjnk}) \quad \forall k \in S, k > 1 \quad (12)$$

$$b_1 = \sum_{m \in T} \sum_{n \in T} xb_{m1nj} \quad (13)$$

$$b_k \leq BC \quad \forall k \in S \quad (14)$$

$$x_{minj}, xb_{minj} \geq 0 \quad \forall m, n \in T, \forall i, j \in S \quad (15)$$

본 모형의 목적은 완충지역을 고려하여 총 복화운송량을 최대화하고 차량 대기시간을 최소화하는 터미널간의 최적 운송 배차계획을 찾는 것이다.

식 (1)에서 (2)은 목적함수로 식 (1)은 복화운송을 최대화하고, 식 (2)는 차량 대기시간을 최소화한다. 복화운송 최대화를 가장 먼저 만족하고, 대기시간을 최소화하는 해를 찾는다. 여기서 복화운송 최대화와 대기시간 최소화는 동시에 만족되기 어렵다. 복화운송 최대화를 대기시간 최소화보다 우선 목적함수로 적용하는 경우 복화운송 최대인 해 중에서 대기시간을 최소화시키는 해가 선택되는 것이다. 반대로 대기시간 최소화를 복화운송 최대화보다 우선 목적함수로 적용하는 경우 최소 대기시간을 가지는 해 중에서 복화운송 최대인 해가 선택된다. 즉, 복화운송 기회를 최대화시키면 대기시간이 증가하고 대기시간을 최소화시키면 복화운송 기회가 감소하는 상충관계를 보이게 된다. 따라서, 실험을 통해 복화운송 최대화와 대기시간 최소화 간의 관계와 최적의 ITT 차량 스케줄링에 적합한 목적함수 적용방법이 검토될 필요가 있다.

식 (3)에서 (8)은 터미널 반출입량에 관한 터미널 처리 용량 제약이다. 식 (3)은 총 운송량에 대한 제약이다. 식 (4)는 시간대  $i$ 에 터미널  $m$ 에서 반출되어 반입터미널로 운송되는 양과 완충지역으로 운송되는 양의 합이 시간대  $i$ 에 터미널  $m$ 의 반출량과 같다는 의미이다. 식 (5)는 시간대  $j$ 에 터미널  $n$ 으로 반입되는 반출→반입 운송량과 완충지역→반입 운송량의 합이 시간대  $j$ 에 터미널  $n$ 으로의 반입량과 같다는 의미이다. 식 (6)은 터미널  $m$ 에서 터미널  $n$ 으로 운송되는 물량에 대한 제약이다. 식 (7)은 각 터미널별 시간대별 반출입 물량에 대한 제약이다. 식 (8)은 반출터미널에 할당된 모든 작업량은 반입 터미널에 할당된 모든 작업량과 같다는 제약이다. 식 (9)는 시간대별 투입 가능한 차량대수에 관한 제약이다.

식 (10)과 (11)은 복화운송 횟수에 관한 제약이다. 해당 제약에서는 시간대  $j$ 에 터미널  $n$ 으로 반입량과 시간대  $j+1$ 에 터미널  $m$ 에서 반출량과 비교하여 적은 값만큼을 복화운송 횟수로 한다.

식 (12)와 (13)은 시간대별 완충지역 보관량 제약이며, 식 (14)는 완충지역 보관 용량 제약을 의미한다.

Table 1 ITT volume between terminals

(From \ To)	A	B	C	D	E	Total
A	-	21,187	11,443	85,505	9,204	127,339
B	22,536	-	37,210	25,598	27,365	112,709
C	15,691	50,086	-	34,318	16,754	116,849
D	65,575	24,730	31,810	-	13,577	135,692
E	5,009	58,918	12,869	8,522	-	85,318
Total	108,811	154,921	93,332	153,943	66,900	577,907

Source : Park and Lee(2017)

Table 2 Test Cases for Model Validation

Terminal Capacity Fluctuation Level	Capacity Classification	Capacity per Hour		Total Capacity
		Min	Max	
Low Level	Terminal A	29	56	1038
	Terminal B	32	64	1176
	Terminal C	26	50	923
	Terminal D	35	69	1268
	Terminal E	18	37	665
	Truck Input	31	110	1591
Normal Level	Terminal A	21	64	1039
	Terminal B	24	72	1176
	Terminal C	19	56	926
	Terminal D	26	78	1269
	Terminal E	14	42	672
	Truck Input	31	110	1591
High Level	Terminal A	14	70	1036
	Terminal B	16	80	1176
	Terminal C	13	62	922
	Terminal D	18	86	1269
	Terminal E	10	45	671
	Truck Input	31	110	1591

## 4. 모형의 실험 및 분석

### 4.1 데이터 생성

모형 실험을 위한 파라미터로 터미널별 시간대별 처리가능한 반출입 물량, 시간대별 운행 희망 최대 차량 대수를 산정한다. 현실성 높은 데이터 생성을 위해 실제 터미널 운영 데이터를 활용하도록 한다. Table 1의 ITT 운송량 데이터를 활용하여 터미널별 시간대별 처리가능한 반출입 물량, 시간대별 운행 희망 최대 차량 대수를 산정한다. Table 1은 2015년 부산 신항 내 터미널 간 ITT 물동량 자료이다.

터미널의 시간대별 가용량은 특정 시간대에 과도한 물량 집중, 긴급한 작업 등 다양한 이유로 그 변동 패턴이 커지거나 줄어들 수 있다. 따라서 시간대별 가용량 패턴의 변동폭에 따라 실험 유형을 설정한다.

실험 유형은 터미널 가용량 변동폭에 따라 크게 3가지 수

준으로 구분하며, 각 유형별로 시간대별 가용량 최대값과 최소값 범위 내에서 랜덤 케이스를 생성한다(Table 2).

#### 4.2 실험 및 분석

대기시간 최소화 목적함수, 복화운송 최대화 목적함수 2가지 목적함수의 우선순위를 다르게 하여 복화운송 최대화 우선( $f_{bh} > f_{dt}$ ) 모형과 대기시간 최소화 우선( $f_{dt} > f_{bh}$ ) 모형에 대해 터미널 가용량 변동폭 수준에 따른 실험 유형 데이터를 적용하여 계산한다.

계산 결과는 Table 3과 같다. 복화운송 최대화 우선 모형( $f_{bh} > f_{dt}$ )은 완충지역 규모가 증가하더라도 1418건, 1375건, 1261건으로 복화운송량은 항상 최대치가 나타난다. 반면 터미널 가용량 변동폭 수준이 보통인 경우 대기시간 최소화 모형은 1359건 복화운송 최대화 모형은 1375건으로 났고, 가용량 변동폭 수준이 높은 경우 복화운송 최대화 모형은 1200건 복화운송 최대화 모형은 1261건으로 나타났다. 이를 통해 대기시간 최소화 모형은 복화운송 최대화 모형보다 복화운송량이 적은 것을 확인할 수 있다. 또한, 대기시간 최소화 모형의 복화운송량은 완충지역 규모가 증가함에 따라 1200건, 1210건, 1230건, 1245건으로 점차 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 1과 Fig. 2는 목적함수 우선순위에 따라 복화운송량과 대기시간 차이를 비교한 그림이다. 터미널 가용량 변동폭이 커질수록 복화운송 최대화 모형과 대기시간 최소화 모형 간의 복화운송량 차이는 3건(1418-1415), 16건(1375-1359), 61건(1261-1200)으로 커지고, 대기시간 차이의 경우도 12시간(92-80), 103시간(627-524), 298시간(687-389)으로 커지는 것을 확인할 수 있다. 터미널 가용량 변동폭 증가에 따라 두 모형 간의 복화운송 차이는 1261건에서 1200건으로 약 5% 까지 나타났고, 대기시간 차이는 687시간에서 389시간으로 약 43% 까지 나타났다. 즉 복화운송 차이보다는 대기시간 차이가 매우 큰 폭으로 나타났다. 이를 통해 복화운송 최대화를 우선하

여 복화운송 기회를 조금 더 확보함에 따라 증가하게 되는 대기시간 폭이 더 크기 때문에 복화운송 최대화 모형은 터미널 가용량 변동폭이 커질수록 적합하지 않다. 따라서, 대기시간과 복화운송 횟수 간의 상충관계에 따라 다목적함수의 우선순위를 검토하였을 때 대기시간 최소화가 복화운송 최대화보다 우선되어야 하며, 목적함수는 대기시간 최소화, 복화운송 최대화 순서가 되어야 한다.

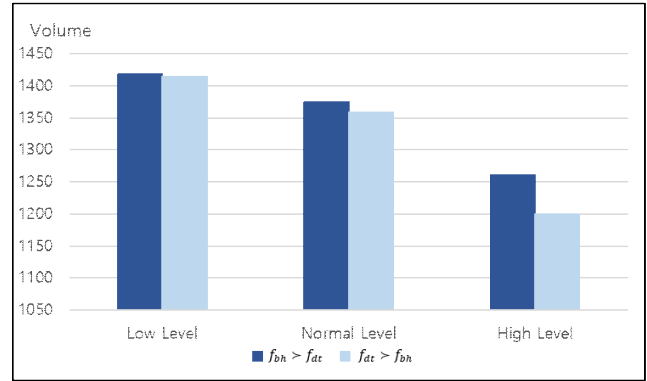


Fig. 1 Comparison of backhaul volume by objective priority(b=0)

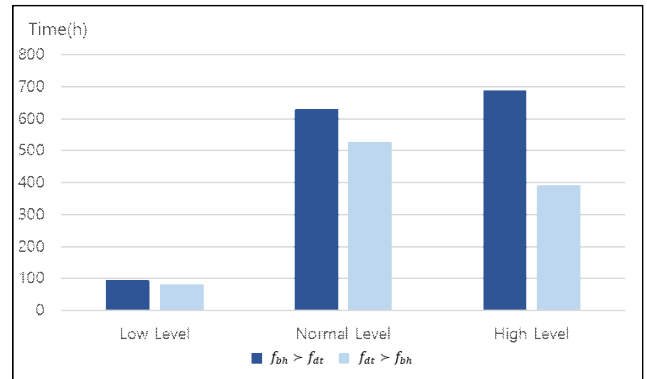


Fig. 2 Comparison of delay time by objective priority(b=0)

Table 3 Test results for buffer utilization effect by objective priority and terminal capacity fluctuation level

Objective Priority	Terminal Capacity Fluctuation Level	Result	Buffer Space											
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
$f_{bh} > f_{dt}$	Low Level	Backhaul Vol.	1418	1418	1418	1418	1418	1418	1418	1418	1418	1418	1418	1418
		Delay Time	92	38	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Normal Level	Backhaul Vol.	1375	1375	1375	1375	1375	1375	1375	1375	1375	1375	1375	1375
		Delay Time	627	481	344	260	184	116	62	22	7	0	0	0
	High Level	Backhaul Vol.	1261	1261	1261	1261	1261	1261	1261	1261	1261	1261	1261	1261
		Delay Time	687	535	414	275	203	143	94	54	24	8	0	0
Unprocessed		120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	
$f_{dt} > f_{bh}$	Low Level	Backhaul Vol.	1415	1418	1418	1418	1418	1418	1418	1418	1418	1418	1418	1418
		Delay Time	80	38	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Normal Level	Backhaul Vol.	1359	1369	1375	1375	1375	1375	1375	1375	1375	1375	1375	1375
		Delay Time	524	434	344	260	184	116	62	22	7	0	0	0
	High Level	Backhaul Vol.	1200	1210	1230	1245	1252	1257	1261	1261	1261	1261	1261	1261
		Delay Time	389	336	287	237	186	136	94	54	24	8	0	0
Unprocessed		120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	

Fig. 3과 Fig. 4는 완충지역 활용에 따른 복화운송 변화 및 대기시간 변화를 나타낸 그림이다. 복화운송 최대화 모형과 대기시간 최소화 모형 간의 복화운송량 및 대기시간 차이는 완충지역 규모가 증가함에 따라 줄어든다. 완충지역을 활용하지 않거나 적을 때 대기시간을 최소화하도록 배차계획을 수립하게 되면 복화운송 횟수를 최대화하지 못하여 불필요한 차량 배차가 추가되는 반면, 완충지역을 다수 활용하게 되면 대기시간을 최소화하면서도 복화운송 횟수를 추가 확보할 수 있다. 완충지역을 활용하는 것은 터미널 가용량이 추가 확보되는 효과를 주어 대기시간 감소와 함께 복화운송 기회도 더 많이 발생하기 때문이다.

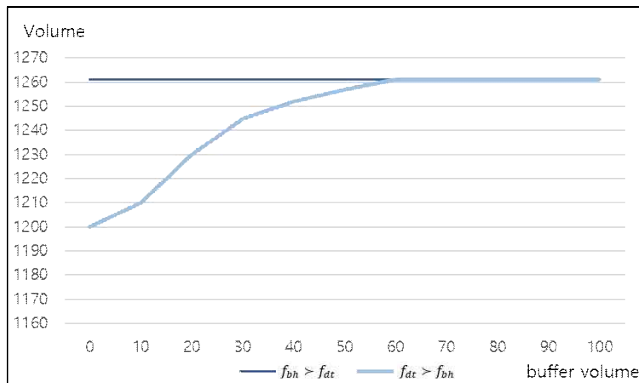


Fig. 3 Backhaul volume analysis as buffer space increases by objective priority

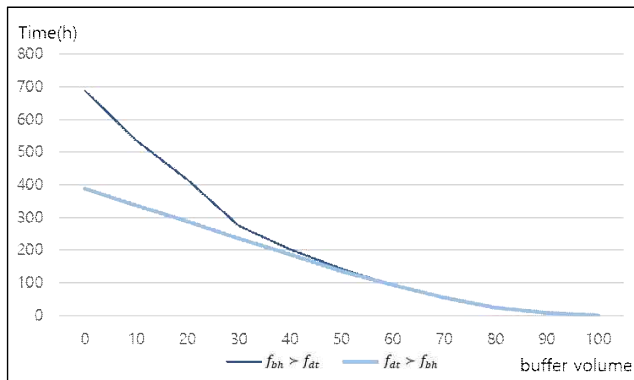


Fig. 4 Delay time analysis as buffer space increases by objective priority

ITT 비효율을 개선시킨다는 측면만 고려했을 때 완충지역 규모를 최대한 확보하는 것이 가장 좋은 방법이다. 하지만 완충지역 규모에 따라 대기시간 감소 및 복화율 증가와 더불어 설비 도입비용, 인건비, 장비비 등의 비용도 함께 증가할 수밖에 없다. 따라서 완충지역 도입에 따라 크게 개선이 이루어질 수 있는 최소한의 규모를 적절한 완충지역 규모라고 할 수 있다. 이러한 측면에서 완충지역 규모 증가 시 대기시간 최소화 모형의 복화운송 증가 추세가 둔화되고, 복화운송 최대화 모형의 대기시간 감소 추세가 둔화되는 수준이 존재한다. 해당 수준은 총 물량대비 약 2%(완충지역 규모 30) 수준으로 적절한 복화운송 물량을 확보하면서도 대기시간을 최소화하는

것이 가능하기 때문에 ITT 복화율 및 대기시간 개선을 위한 적정 완충지역 규모라고 할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구는 부산항 환적 경쟁력 강화를 위해 ITT 복화율을 높일 수 있는 방안으로서 완충지역을 활용한 복화운송 최대화 수리모형을 제시하였다. 복화운송이 지나치게 증가하면 오히려 차량 대기시간이 증가하여 비효율을 발생시킬 수 있기 때문에 우선적으로 복화운송을 최대화하되, 차량 대기시간이 증가하는 비효율을 최소화할 수 있는 혼합정수계획모형을 제시하였다. 그리고 실제 운영 데이터에 기반한 실험을 통해 완충지역 활용에 따른 복화율 개선 효과를 분석하였다.

분석 결과 복화운송 최대화를 우선한 경우 복화운송 기회를 조금 더 확보함에 따라 증가하게 되는 대기시간 폭이 더 크게 나타났고 이에 따라 목적함수는 대기시간 최소화, 복화운송 최대화 순서가 적절한 것으로 나타났다. 그리고 완충지역 활용에 따라 복화운송량과 대기시간의 상충관계가 약화되는 것을 확인하였다. 또한, 복화운송 증가 추세와 대기시간 감소 추세가 크게 둔화되는 수준이 존재하였다. 해당 수준은 총 물량대비 약 2% 수준으로, 적절한 복화운송 물량을 확보하면서도 대기시간 최소화가 가능하기 때문에 ITT 복화율 및 대기시간 개선을 위한 적정 완충지역 규모라고 할 수 있다.

본 연구에서 제시한 복화운송을 최대화하는 ITT 배차 모형은 실제 운영 데이터에 기반한 실험 및 분석을 통해 복화율 개선 효과가 검증되었고, 완충지역 활용에 따른 복화운송 증가, 대기시간 감소 효과가 확인되었다. 따라서 본 연구에서 제시한 모형은 현행 ITT 시스템의 비효율 개선을 위한 방안으로 검토될 수 있다고 생각되며, 향후 완충지역 도입 검토 시에도 복화운송 및 대기시간 개선 효과 분석을 위한 접근 방법으로 활용 될 수 있다.

향후 연구에서는 복화운송과 대기시간에 대한 한계손익 검토가 필요하다. 복화운송과 대기시간의 비교척도도 다르게, 운영적 상황에 따라 목적함수의 우선순위가 다르게 적용되어야 할 수 있기 때문이다. 또한, 해당 추가 검토를 통해 완충지역 규모에 따른 복화율 개선 효과에 대한 비용적 검토 연구가 이루어질 필요가 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] Adi, T. N., Iskandar, Y. A. and Bae, H. R.(2020), "Interterminal Truck Routing Optimization Using Deep Reinforcement Learning", Sensors, 20.
- [2] Baek, Y. J.(2017), "A Feasibility Study on Effective Operation of ITT(Inter Terminal Transportation) Utilizing Big Data", Master Thesis of Korea Maritime

- and Ocean University.
- [3] Gharehgozli, A. H., de Koster, R. and Jansen, R.(2016), “Collaborative Solutions for Inter Terminal Transport”, *International Journal of Production Research*, 55.
- [4] Heilig, L. and Voss, S.(2016), “Inter-terminal transportation: an annotated bibliography and research agenda”, *Flex Serv Manuf J*
- [5] Heilig, L., Lalla-Ruiz, E. and Voss, S.(2017), “Multi-objective inter-terminal truck routing”, *Transportation Research Part E*, 106, pp. 178-202.
- [6] Hu, Q., Corman, F., Wiegmans, B. and Lodewijks, G.(2018), “A tabu search algorithm to solve the integrated planning of container on an inter-terminal network connected with a hinterland rail network”, *Transportation Research Part C*, 91, pp. 15-36.
- [7] Hu, Q., Luan, X., Corman, F. and Lodewijks, G.(2016), “A Tabu Search Algorithm for Inter-terminal Container Transport”, *IFAC-PapersOnLine*, 49-3, pp. 413-418.
- [8] Jin, X. and Kim, K. H.(2018), “Collaborative Inter-Terminal Transportation of Containers”, *Industrial Engineering & Management Systems*, 17(3), pp. 407-416.
- [9] Jo, M. J., Lee, S. P. and Kim, H. S.(2020), “A Study on the Advance Transportation System for Inter Terminal Transshipment: Focused on the Busan New Port”, *Journal of Korean Navigation and Port Research*, Vol. 44, No. 4, pp. 298-304.
- [10] Kim, H. B. and Kim, K. H.(2015), “A Lagrangian Relaxation Method for Inter-Terminal Transshipment of Containers”, *Korean Institute of Industrial Engineers, The 2nd East Asia Workshop on Industrial Engineering 2015*, 3125-3132.
- [11] Korea Railroad Research Institute(KRRI)(2013), “A Planning Research of Inter-Terminal Container Transportation System”, p. 262.
- [12] Lee, D. H., Jin, J. G. and Chen, J. H.(2012), “Terminal and yard allocation problem for a container transshipment hub with multiple terminals”, *Transportation Research Part E*, 48, pp 516-528.
- [13] Mishra, N., Roy, D. and van Ommeren(2016), “A Stochastic Model for Interterminal Container Transportation”, *Transportation Science*, pp. 1-21.
- [14] Nieuwkoop, F., Corman, F., Negenborn, R. and Lodewijks, G.(2014), “Determining inter terminal transport configurations at the Maasvlakte by integer programming”
- [15] Oh, S. M., Jeon, H. M. and Park, H. J.(2014), “A Study for Efficient Inter-Terminal Transportation in the Busan New Port”, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol 15, No. 3, pp. 1279-1287.
- [16] Park, G. C.(2019), “A Case Study on the Application of Busan Port ITT Service using Blockchain and Future work”, *Proceedings of the Korean Institute of Navigation and Port Research Conference*, pp. 117-118.
- [17] Park, H. J.(2017), “Vehicle Scheduling Model for Transshipment Container Cargo between Container Terminals”, *Master Thesis of Korea Maritime and Ocean University*.
- [18] Park, H. J.(2022), “Development of Transportation Models for Transshipment Container Cargo between Container Terminals using Buffer Space”, *Doctoral Thesis of Korea Maritime and Ocean University*.
- [19] Park, H. J., Shin, J. Y. and Choi, Y. H.(2021), “A Study on the Improvement of Inter-Terminal Transportation Using Buffer Space”, *Journal of Korean Navigation and Port Research*, Vol. 45, No. 6, pp. 314-324.
- [20] Park, J. K.(2017), “Study on ITT Platform to Enlarge the Transit Cargo in Busan New Port”, *Master Thesis of Korea Maritime and Ocean University*.
- [21] Park, N. K. and Lee, J. H.(2017), “The Evaluation of Backhaul Transport with ITT Platform - The Case of Busan New Port -”, *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education*, Vol. 29, No. 2, pp. 354-364.
- [22] Park, S. K. and Kim, Y. D.(2016), “Simulation Model Development for Configuring a Optimal Port Gate System”, *Journal of Korean Navigation and Port Research*, Vol. 40, No. 6, pp. 421-430.
- [23] Schroer, H., Corman, F., Duinkerken, M. B., Negenborn, R. R. and Lodewijks, G.(2014), “Evaluation of Inter Terminal Transport Configurations at Rotterdam Maasvlakte using Discrete Event Simulation”, *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference*.
- [24] Tierney, K., Voss, S. and Stahlbock, R.(2014), “A mathematical model of inter-terminal transportation”, *European Journal of Operational Research*, 235, pp 448-460.

Received 02 May 2022

Revised 17 May 2022

Accepted 15 June 2022