

컨테이너 항만의 철도 운송 터미널 설계변수 결정

정봉주¹ · 이병권¹ · 김갑환^{1*} · 서정훈² · 박순오³

¹부산대학교 산업공학과 / ²부산대학교 유비쿼터스항만물류기술연구센터 / ³(주)브이엠에스솔루션스

Determining Values of Design Parameters for a Rail Transportation Terminal in a Container Port

Bong Joo Jeong¹ · Byung Kwon Lee¹ · Kap Hwan Kim¹ · Jung Hun Seo² · Soon Oh Park³

¹Department of Industrial Engineering, Pusan National University, Busan 609-735

²Research Center for Ubiquitous Port Logistics Technology, Pusan National University, Busan 609-735

³VMS Solutions Co., Ltd., Daejeon 305-701

Rail transportation terminals play an important role in inland transportation systems, because the operation productivity in the terminals significantly influences the efficiency of the whole transportation systems. This paper addresses a design method of a real rail terminal that satisfies a pre-specified throughput capacity. In order to construct high performance rail terminal, it is shown how design parameters can be estimated systematically. Examples of the design parameters are the number of transshipment tracks, the number of rail cranes, and the number of internal trucks. These design parameters are estimated by using simple equations and the validity of the values of these parameters are tested by using simulation. Furthermore, some iterative correction procedure, which uses the simulation technique and the equations alternately, are proposed.

Keyword: rail transportation terminals, design parameters, simulation, iterative correction procedure

1. 서론

최근의 선진항만의 추세는 환경과 비용 등의 이유로 철도 수송의 중요성이 강조되고 있어 항만에는 항상 철도 수송 터미널의 중요성이 커지고 있다. 이는 컨테이너항만이 단순히 수출입 화물의 수송거점인 아니라 내륙수송의 거점으로서의 역할까지 포함하는 복합물류 시설로 발전하고 있음을 보여준다. 이에 비하여 우리나라는 철도의 화물 분담률이 낮아 이를 높이기 위해서라도 철도수송에 더 많은 투자가 필요하고 이와 아울러 철도수송의 합리화를 위한 기술개발이 필요하다고 할 수 있다.

국내 컨테이너 화물의 내륙 운송 수단은 크게 트럭을 이용한 도로운송, 열차를 이용한 철도운송, 선박을 이용한 연안운송의 세 가지로 나눌 수 있다. 도로운송은 주로 근거리 운송과 문전에서 문전까지의 이송을 목적으로 하는 경우에 사용되며 철도운송은 중량이 무거운 화물이나 중장거리 운송에 많이 사용되고 있다. 연안운송은 장거리 수송이나 특수한 화물의 경우 사용되어진다.

국내 철도 운송은 1899년 경인선 운행을 기점으로 시작되었다. 1960년대 초에는 철도의 화물 분담률이 88.2%일 정도로 국내 운송의 핵심적인 역할을 담당하였다. 그러나 정시 운송의 어려움과 운송 절차의 복잡성, 그리고 특히 문전 수송의 어려

본 연구는 해양수산부의 '지능형 항만물류 시스템 기술개발' 사업의 일환으로 수행되었음.

*연락처 : 김갑환 교수, 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지 부산대학교 산업공학과, Fax : 051-512-7603,

E-mail : kapkim@pusan.ac.kr

2006년 11월 접수, 2회 수정 후 2007년 04월 게재확정.

움 등으로 분담률은 점차 낮아지게 되었다. 철도는 트럭과는 달리 궤도 운송만을 목적으로 대형 자본이 투자되기 때문에 투자규모가 크지만 거리가 멀어질수록 운송비가 낮아지고 저공해와 안전성, 그리고 정시성이 높다는 장점을 가지고 있다.

2005년도 부산항의 물동량 감소에 따라 도로운송 및 연안 해송은 전년대비 1.2%, 19.0% 감소하였으나, 철도운송은 8.7%가 증가하였다. 또한 광양항의 경우 도로운송 및 철도운송 부분이 각각 18.0%, 29.2%로 증가하였으나 연안운송은 78.9% 감소하였다. 부산항과 광양항 모두 물류비 절감과 도로운송 분담률을 줄이기 위해 철도운송 능력을 향상시키려는 노력을 지속적으로 추진하고 있다(Korea Container Terminal Authority 2006).

유럽의 경우 향후 늘어날 철도 운송 물동량을 감당할 수 있는 새로운 개념의 철도 운송 터미널에 대한 연구가 진행되고 있다. 크게는 새로운 철도 운송 네트워크 설계에 대한 연구와 신개념 운영 방식, 또한 철도 운송 터미널의 생산성을 향상시키는 보다 진보된 하역 장비들에 대한 연구가 진행되어지고 있다(Bontekoning(2002), Bontekoning and Kreutzberger(1999), Bontekoning and Kreutzberger(2001)).

기존 연구문헌들을 살펴보면 철도 운송 터미널에 관련된 많은 연구가 이미 수행되었음을 알 수 있다. 그러나 대부분의 문헌들이 터미널의 작업계획과 내부 운영문제 혹은 터미널 간의 수송문제에 초점을 두고 있고 터미널 자체의 설계에 대해서는 연구가 미흡한 실정이다.

Kozan(2000)은 철도 운송 터미널을 포함하는 컨테이너 항만에서 컨테이너 흐름을 모델링하였다. 이 논문에서는 철도 운송 터미널은 컨테이너 항만에 포함되는 하나의 시스템으로서 표현하였고 각 시스템간의 물량 흐름을 네트워크 모형으로 표현하였다.

Arnorld *et al.*(2004)는 터미널 내부의 운송문제가 아닌 철도 네트워크 문제에 초점을 두고 비용을 최소화하는 터미널의 위치결정을 제시하는 사례연구를 하였다. 다양한 위치결정 시나리오를 시뮬레이션을 이용해 비교분석하였다.

Corry and Kozan(2006)은 운송 대상 컨테이너들을 열차에 할당하는 문제를 컨테이너의 크기, 화차에서의 위치, 특수 컨테이너 고려 등과 같은 다양한 제약조건을 고려하여 모델링하였고 이를 기반으로 의사결정지원시스템을 개발하였다.

Kanacilo and Verbraeck(2006)은 철도 운송 터미널의 인프라 시설의 제어 흐름에 초점을 두고 이를 설계단계에서 평가하기 위한 시뮬레이터를 개발하였다. 그들은 객체지향적인 설계를 통해 다양한 환경의 사용자에게도 적합하게 사용될 수 있는 시뮬레이터를 개발하였고 XML을 활용하여 기존의 다른 정보시스템과 연동될 수 있도록 하였다.

Alicke(2002)는 철도 운송 터미널 내의 컨테이너 이송에 대한 문제를 모델링하고 이를 컨테이너 환적순서를 결정하기 위해 제약만족기법을 사용하였다. 특히, 다수의 열차와 다수의 크레인이 작업 가능하고 열차간 직접 환적(direct trans-shipment)과 셔틀(shuttle)을 거치는 비직접 환적(indirect trans-shipment)을 모

두 고려하는 문제를 풀이하였다.

Ballis and Golias(2002)는 본 연구와 가장 가까운 연구로서 철도 운송 터미널의 설계를 위한 설계 파라미터들을 정의하고 분석하였다. 다양한 설계 대안을 입력하고 비용 대 시설규모를 분석해 볼 수 있는 시스템을 개발하여 여러 설계 대안을 평가할 수 있도록 하였다. 이 시스템은 사용자 인터페이스에 해당하는 전문가 시스템 모듈과 시나리오 평가를 위한 시뮬레이션 모듈, 그리고 비용분석을 위한 계산모듈로 구성되어 있다. 그러나 설계 파라미터 자체를 평가하기 보다는 사용자에게 제시한 설계 파라미터를 입력 받아 설계안을 만들고 해당 설계안의 평가하는 과정에 초점을 두고 있다.

본 연구에서는 철도 운송 터미널의 설계를 위한 주요 설계 파라미터들을 목표 생산성에 비추어 추정하는 방안을 사례연구를 통해 다루고자 한다. 설계 파라미터란 작업 선로의 수, 크레인의 수, 야드 트럭(Yard Truck; YT)의 대수와 같은 터미널의 건설과 관련된 파라미터로서 이는 비용뿐만 아니라 향후 작업 생산성과도 밀접한 관련이 있으므로 설계계획 단계에서부터 효과적으로 추정되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 주요 설계 파라미터들의 값을 보다 효과적으로 결정하기 위하여 시뮬레이션과 수식계산을 반복적으로 수행하여 설계 파라미터 값을 보정해 나가는 방식을 채택하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 철도 운송 터미널의 기본적인 소개를 한다. 제 3장에서는 본 연구에서 수행한 철도 운송 터미널의 설계 절차에 대해 설명하고 설계 파라미터들을 추정하는 수리모형을 제시한다. 제 4장에서는 수리모형을 통해 추정된 설계 파라미터들을 시뮬레이션을 통해 평가한다. 또한 평가된 자료를 기반으로 수리모형을 통해 설계 파라미터들을 재추정하고 이를 다시 시뮬레이션으로 통해 평가하는 반복적인 과정을 설명한다. 제 5장에서는 설계변수에 관한 기타 논의 사항 등을 설명한다. 마지막으로 제 6장에서는 연구결과를 종합하고 결론을 맺는다.

2. 철도 운송 터미널 내의 컨테이너 흐름

본 논문에서 소개하는 철도 운송 터미널의 기본적인 목적은 수송 모드의 전환이다. 즉 중·장거리로 수송되어져 오는 열차 차량 위의 컨테이너를 YT로 옮겨 항만 컨테이너 터미널로 이송한 후 선박을 통해 해외로 수출하게 된다. 반대로 수입화물의 경우 선박을 통해 들어온 컨테이너가 YT로 옮겨져 열차에 실려져 내륙으로 수송된다.

철도 운송 터미널의 기본적인 구조는 <Figure 1>과 같다. 철도 크레인 아래에는 기본적으로 작업선과 임시저장소가 위치한다. 그리고 크레인의 좌우로 YT가 주행하는 주행로와 정차하여 작업할 수 있는 작업로가 있다. 작업선은 실제로 철도 운송 터미널 내에서 열차가 진입 후 정차하는 공간이며 크레인의 작업이 완료될 때까지 머무르는 선로이다. 작업선 외에도

작업선에 진입하기 위해 열차가 대기하거나 출발 전에 대기하는 기회선과 열차의 주행을 위해 필요한 본선이 있다.

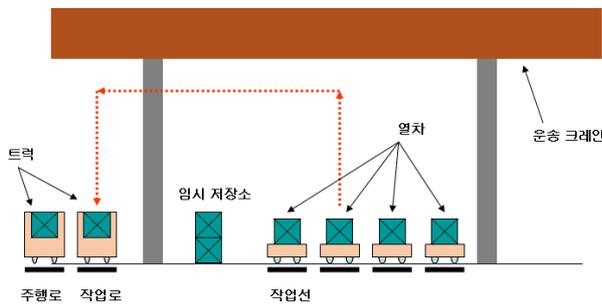


Figure 1. Cross Sectional View of a Rail Terminal

열차와 YT간의 작업은 크게 두 가지 형태로 나눌 수 있다. 첫째는 화차와 YT간의 직상하차 방식이고 둘째로는 작업로와 작업선 사이의 공간을 저장소로 활용하는(이를 ‘임시 저장소’라고 한다) 상하차 방식이다. 첫 번째의 방식은 YT에서 열차로 또는 열차에서 YT로 직접적으로 컨테이너를 이적 가능한 경우이다. 두 번째 방식은 YT와 대상 화차에 모두 컨테이너가 적재되어 있을 경우, 아직 YT가 도착하지 않았을 경우에 사용될 수 있는 작업방식이다.

간단하게 각 작업들을 살펴보면 다음과 같다. 열차가 터미널의 작업선으로 진입하면 크레인은 열차에 적재되어있는 수출 컨테이너를 들어서 YT로 이적한다. 만약 YT 위에 수입 컨테이너가 있을 경우에는 크레인은 수출 컨테이너를 임시저장소에 잠시 내려놓고 YT 위의 수입 컨테이너를 들어서 열차에 상차 한 후 임시 저장소에 내려놓았던 수출 컨테이너를 YT에 싣게 된다. 만약 YT가 미처 도착하지 않은 경우에도 임시 저장소를 사용하게 된다.

본 연구에서는 열차와 YT간의 컨테이너 이송을 위해 크레인을 사용하는 것으로 한다. 그러나 소규모의 철도 운송 터미널의 경우 크레인 대신 리치 스택터(reach stacker)나 그 외의 장비를 사용하기도 한다.

3. 철도 운송 터미널의 설계 절차

앞서 기술한 바와 같이, 본 연구는 향상된 서비스 수준을 갖춘 철도 운송 터미널의 건설을 위해 설계단계에서 고려해야할 체계적인 방안을 제시하고자 한다. 사례 연구를 통해 구체적인 대상 터미널을 한정하고 이를 대상으로 설계 파라미터들을 추정하고 시뮬레이션을 이용해 보정할 것이다.

본 연구에서 제안하는 전체적인 절차는 <Figure 2>과 같다. 먼저, 건설하려는 대상 철도 운송 터미널을 선정하고 이에 따른 여러 설계 파라미터들을 추정한다. 추정된 설계 파라미터들은 시뮬레이션의 기본 입력 수치로서 사용되며 시뮬레이션 결과를 보고 설계 파라미터들을 개선하는 과정을 반복적으로

수행한다.

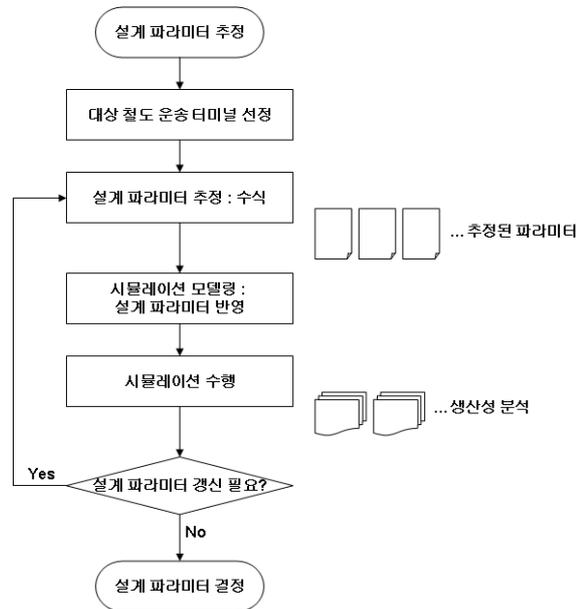


Figure 2. Estimating Procedure of Design Parameters

본 연구는 사례연구이기에 대상 철도 운송 터미널을 굳이 선정할 필요 없이 <Figure 3>와 같은 형태를 대상으로 한다.

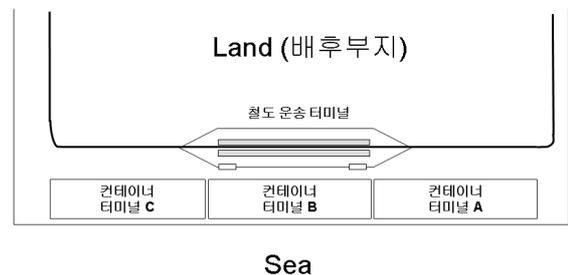


Figure 3. Location of the Target Rail Terminal

대상 철도 운송 터미널은 컨테이너 항만에 위치하고 있으며 3개의 특정 컨테이너 터미널에 대해 공용으로 서비스를 제공한다. 현실적으로는 배후부지에 위치한 여러 산업시설들의 물량수송을 위해서도 사용될 수 있겠으나 배후부지에 어떤 산업시설이 입지하는가에 따라 그에 따른 물량분포가 달라질 수 있으므로 본 연구에서는 배후부지의 물량을 고려하지 않기로 한다.

대표적인 설계 파라미터로는 작업선(선로)의 개수, 크레인의 대수, 그리고 YT의 대수를 들 수 있다. 이는 철도 운송 터미널의 인프라(infrastructure) 시설에 관련되는 요소이기 때문이다. 이 중에서 작업선의 개수는 크레인의 대수와 연관되는 설계 파라미터로서 크레인의 대수는 작업선의 개수를 제한한다. 본 논문에서는 레이아웃을 변경하지 않고 향상된 서비스 수준을 갖춘 철도 운송 터미널을 설계하기 위해 크레인의 대수와

YT의 대수를 결정하기 위한 문제에 초점을 두어 설명한다.

3.1 목표 물동량

앞에서 간단히 언급했듯이 <Figure 3>이 본 연구에서 사용될 컨테이너 항만에서의 컨테이너 터미널과 철도 운송 터미널의 배치 모습이다. 이 가상 항만은 총 3개의 컨테이너 터미널로 구성되어 있다. 그리고 이 3개의 컨테이너 터미널로부터 철도 운송 터미널이 처리해야 할 목표 물동량은 280,000 TEU로 설정한다. 목표 물동량은 철도 운송 터미널에서 처리해야 할 터미널 목표 생산성이다.

3.2 설계 파라미터 결정을 위한 수리 모형

대상 터미널이 목표로 하는 처리물동량이 정해졌다면 철도 운송 터미널의 설계를 위한 주요한 설계 파라미터들을 추정해야 한다. 본 연구에서는 이러한 설계 파라미터들을 추정하기 위해 기존의 설계 실무자들이 사용하고 있는 경험적인 수준의 수리적 모형을 이용하기로 한다. 이 수식들은 경험과 컨테이너 수송 흐름에 대한 지식에 의존하여 정형화된 것으로서 실무자들이나 관련기관들 사이에서도 조금씩 다르게 사용되고 있다. 본 절에서는 이를 수식기호를 사용하여 체계적으로 정리하고 구체적인 수치를 적용하여 필요한 설계 파라미터들의 결과 값을 도출한다.

먼저 필요한 수식유도에 필요한 상수 파라미터들을 기호화하여 정리하면 아래와 같다.

Q_{YEAR}	: 철도 운송 물동량(TEU)
C_M	: 크레인의 기계적 시간당 처리 개수
η	: 크레인의 작업 효율
W_Y	: 연간 작업 일수
W_D	: 일일 작업 시간
F_{TEU}	: TEU factor(컨테이너 개수를 TEU 단위로 바꾸는 변환계수)
F_P	: Peak factor(물동량의 변화 고려)
T_W	: 열차 당 평균 화차(wagon) 개수
D_R	: 직상하차 비율(YT와 열차 사이의 컨테이너 임시창치가 없는 작업비율)
T_{SETUP}	: 기관차의 위치를 바꾸는 등, 도착, 출발전후의 소요시간

위의 상수 파라미터들을 기반으로 하여 기본적인 설계 파라미터들을 포함한 여러 관련 파라미터들이 계산되어 질 수 있다. 먼저 크레인과 관련된 파라미터들은 아래와 같은 수식으로 계산되어질 수 있다.

$$C_{HOURLY} : \text{크레인의 시간당 하역능력(van)} \\ C_{HOURLY} = C_M \times \eta \quad (1)$$

$$C_{DAY} : \text{크레인의 1일 처리능력(van)} \\ C_{DAY} = C_{HOURLY} \times W_D \quad (2)$$

$$C_{REQ} : \text{크레인 소요대수} \\ C_{REQ} = \frac{Q_{YEAR} \times F_P}{C_{HOURLY} \times W_D \times W_Y \times F_{TEU}} \quad (3)$$

$$C_{TOTAL} : \text{전체 운송크레인의 연간 컨테이너 하역능력(van)} \\ C_{TOTAL} = C_{HOURLY} \times W_D \times W_Y \times C_{REQ} \quad (4)$$

$$Q_{DAY} : \text{1일 컨테이너 하역처리량(van)} \\ Q_{DAY} = \frac{Q_{YEAR} \times F_P}{W_Y \times F_{TEU}} \quad (5)$$

열차작업과 관련된 수식은 아래와 같이 정리될 수 있다.

$$C_{HAND} : \text{1개의 컨테이너를 하역하기 위해 필요한 운송크레인의 평균 조작회수} \\ C_{HAND} = D_R + (1 - D_R) \times 2 \quad (6)$$

$$T_{TEU} : \text{열차당 컨테이너 적재량(TEU)} \\ T_{TEU} = T_W \times 2 \quad (7)$$

$$T_{VAN} : \text{열차당 평균컨테이너 적재개수(VAN)} \\ T_{VAN} = \frac{T_{TEU}}{F_{TEU}} \quad (8)$$

$$T_{LOAD} : \text{열차당 상하차 소요시간} \\ T_{LOAD} = \frac{T_{TEU} \times C_{HAND}}{C_{HOURLY} \times F_{TEU}} \quad (9)$$

$$T_{TRAIN} : \text{열차당 터미널 내 총 소요시간} \\ T_{TRAIN} = T_{SETUP} + T_{LOAD} \quad (10)$$

마지막으로 열차수와 선로수에 관계된 수식은 아래와 같다.

$$N_{T1} : \text{1일 하역 처리 소요 열차 수} \\ N_{T1} = \frac{Q_{DAY}}{T_{VAN}} \quad (11)$$

$$N_{T2} : \text{1선로당 1일 열차처리능력(열차 수)} \\ N_{T2} = \frac{W_D}{T_{TRAIN}} \quad (12)$$

$$N_{TRACK} : \text{소요 선로수} \\ N_{TRACK} = \frac{N_{T1}}{N_{T2}} \quad (13)$$

앞의 정리된 수식을 실제 예제에 적용하여 설계 파라미터들을 추정해 보았다. 본 연구에서 사용된 예제에 적용된 상수 파라미터들은 아래와 같다.

앞에서 사용한 예제의 상수 파라미터들은 추정되어진 데이

터들과 주어진 데이터 두 가지로 나눌 수 있다. 예를 들어 철도 운송 물동량, 크레인의 사이클 타임, 연간 작업일수, 피크계수 등은 주어진 데이터로서 이를 그대로 받아들여 사용할 수 있으나 크레인의 작업 효율과 직상하차 비율은 시뮬레이션 결과에 해당하는 데이터로서 검증이 필요하다.

- Q_{YEAR} : 280,000 TEU / year
- C_M : 43.5 van / hr
- η : 45%
- W_Y : 330 day / year
- W_D : 20 hr / day
- F_{TEU} : 1.48
- F_P : 1.25
- T_W : 25
- D_R : 0.6
- T_{SETUP} : 0.33 hr

위의 입력 파라미터들을 앞에서 언급한 수식에 대입해서 추정된 철도 운송 터미널의 파라미터들은 다음과 같다.

- C_{REQ} : 1.83 cranes \approx 2 cranes
- C_{TOTAL} : 236,426.9 \approx 236,427(van)
- Q_{DAY} : 716.6 van / day \approx 717 van / day
- N_{T1} : 21.2 train / day
- N_{T2} : 7.28 train / day / track
- N_{TRACK} : 3 tracks

4. 시뮬레이션

본 논문에서는 철도 운송 터미널의 추정된 설계 파라미터들 중 크레인의 작업 효율성과 YT의 대수를 시뮬레이션을 통해 보정한다. <Figure 4>는 구현하게 될 철도 운송 터미널의 레이아웃을 표현한 것이다. 여기서 적용된 설계 요소들은 앞서 제시한 수리모형을 이용하여 설계 파라미터들을 계산하여 그 값들을 적용한 것이다. 그림에서 보듯이 터미널 내의 작업 영역은 게이트 방향과 그 반대 방향으로 나누어져 있다.

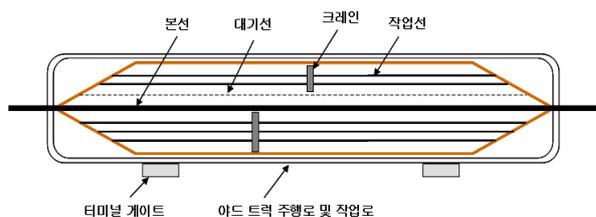


Figure 4. Entire Layout of the Rail Transportation Terminal

<Figure 4>를 살펴보면 본 철도 운송 터미널에는 본선이 철도 운송 터미널의 중간에 위치하고 있음을 알 수 있다. 본선은 철도 운송 터미널과 외부를 연결시켜주고 있으며 열차의 주행에 필요한 선로이다. 철도 운송 터미널에는 필수적으로 한 개의 대기선이 설치되어야 한다. 대기선은 열차의 진입 혹은 출발 시에 다른 열차와의 간섭을 피하기 위한 여유 공간이다. 그리고 5개의 작업선이 계획되어 있다. 3개의 작업선은 컨테이너항만 방향에 위치하고 있으며 두 개의 작업선은 배후 부지 방향에 위치하고 있다. 3.2 절에서 추정된 작업선의 개수는 3개였지만 터미널을 계획하면서 추후 물동량의 증가를 고려하여 2개의 작업선을 여분으로 배치하였다. 그리고 YT의 출입을 위해 2개의 게이트를 설계하였으며 YT의 주행로가 전체 터미널을 감싸듯이 배치되고 작업로는 주행로 안쪽 도로를 사용한다. 각 작업 영역별로 한 개씩의 크레인이 작업하도록 설계하였다. 그리고 철도 운송 터미널에서 운행되어질 YT의 대수는 아래의 절차를 통해 구해진다. 먼저 YT의 주행 시간에 관한 상수 파라미터들은 아래와 같이 정의하였다.

- T_R : YT의 평균 순수 주행시간.
rail terminal \rightarrow port terminal \rightarrow rail terminal과 같이 주행하는데 소요되는 시간을 의미함.
- T_P : 각 컨테이너 터미널에서의 평균대기 시간
- T_D : 철도 운송 터미널에서 평균대기 시간
- T_{AVG} : 평균 왕복 주행시간
 $T_{AVG} = T_R + T_P + T_D$ (14)

앞의 정리된 파라미터들을 사용하여 YT의 소요 대수를 구하는 수식을 정리하면 아래와 같다.

$$Y_{TRIP} : \text{YT 1회 운행당 운반 컨테이너 양 (van)} \quad (15)$$

$$Y_{DAY} : \text{YT 당 일일 작업 능력}$$

$$Y_{DAY} = \frac{(W_D \times 60 \times Y_{TRIP})}{T_{AVG}} \quad (16)$$

$$Y_{REQ} : \text{YT 소요 대수}$$

$$Y_{REQ} = \frac{Q_{DAY}}{Y_{DAY}} \quad (17)$$

참고로 식 (5)의 Q_{DAY} 를 위한 계산식에서 이미 peak factor를 반영하였으므로 식 (17)에서는 peak factor를 반영할 필요가 없다.

앞의 정리된 수식을 실제 예제에 적용하여 YT와 관련된 파라미터들을 추정해 보았다. 본 연구에서 사용된 예제에 적용된 상수 파라미터들은 아래와 같다.

- T_R : 25~26분
- T_P : 3분
- T_D : 3분
- T_{AVG} : 31~32분

식 (17)에서 구해지는 YT 소요대수는 YT의 대기시간을 고려하지 않은 추정치로서 소요대수의 상한이라고 할 수 있다. 이를 보정하기 위해서 본 연구의 사례에서는 Y_{TRIP} 의 값을 1로 놓고 초기해를 추정하였다. 이를 수식에 대입하여 추정된 YT의 소요 대수는 아래와 같다.

$$Y_{DAY} : (20 \text{ hr} \times 60) / 31 \sim 32 = 37.5 \sim 38.7 \text{ van / day}$$

$$Y_{REQ} : 717 / 38.7 \sim 717 / 37.5 = 18.5 \sim 19.1$$

크레인의 대수를 추정 할 때와 마찬가지로 YT의 대수를 구하는 과정에서도 검증되어야 하는 상수 파라미터들이 사용되었다. 이러한 파라미터들은 시뮬레이션과 수리모형을 이용하여 반복적으로 보정하는 과정을 통해 갱신되면서 설계 파라미터들을 보다 정확한 값으로 수렴하게 된다.

4.1 시뮬레이션에서의 작업 절차의 구현

앞에서 기술한 레이아웃을 기반으로 시뮬레이션을 모델링하는 과정을 설명하고자 한다. 시뮬레이션에서 작업을 수행하는 주요 객체로는 열차, 크레인, 그리고 YT를 들 수 있다.

이 중에서 열차의 작업절차는 비교적 간단하다. 철도 운송 터미널에 진입한 열차는 크레인에 의해 YT와의 컨테이너 환적(transshipment) 작업이 이루어지게 되고 작업이 완료된 열차는 다시 터미널을 빠져나가게 된다.

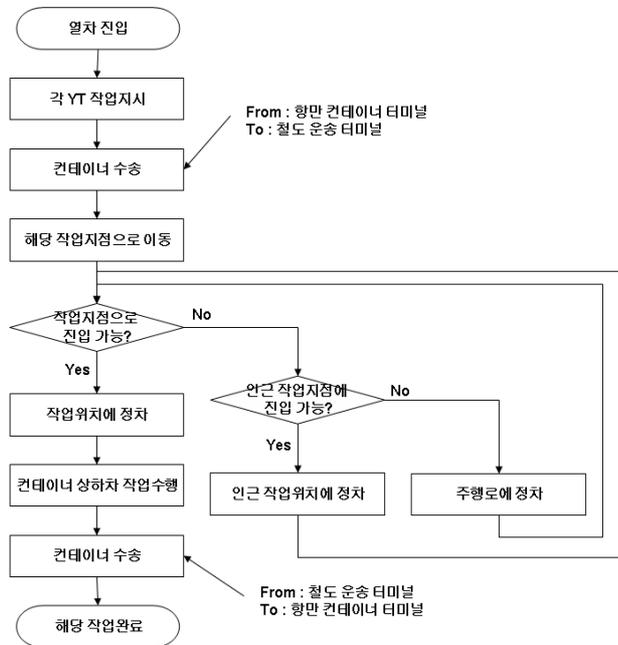


Figure 5. Operation Sequence of an YT

YT 작업은 <Figure 5>와 같이 나타낼 수 있다. 열차의 진입 정보는 개별 YT에게 알려지게 되고 개별 YT는 작업 리스트를

생성하게 된다. 이 작업 리스트의 순서대로 YT는 수입 컨테이너를 컨테이너 터미널로부터 철도 운송 터미널까지 수송하고 반대로 철도 운송 터미널로부터 컨테이너 터미널까지 수출 컨테이너를 수송하게 된다. YT가 작업로의 해당 작업위치에 진입할 수 없는 경우 즉, 대기열이 발생하게 될 경우 인근 작업로에서 대기한다. 이 때 대기하는 인근 작업로가 다른 YT의 작업에 방해가 될 경우 주행로 상에서 대기하게 된다. <Figure 5>는 개별 작업별 순서만을 도시한 것으로 모든 YT가 모든 개별 작업에 대해 <Figure 5>와 같은 순서로 진행된다.

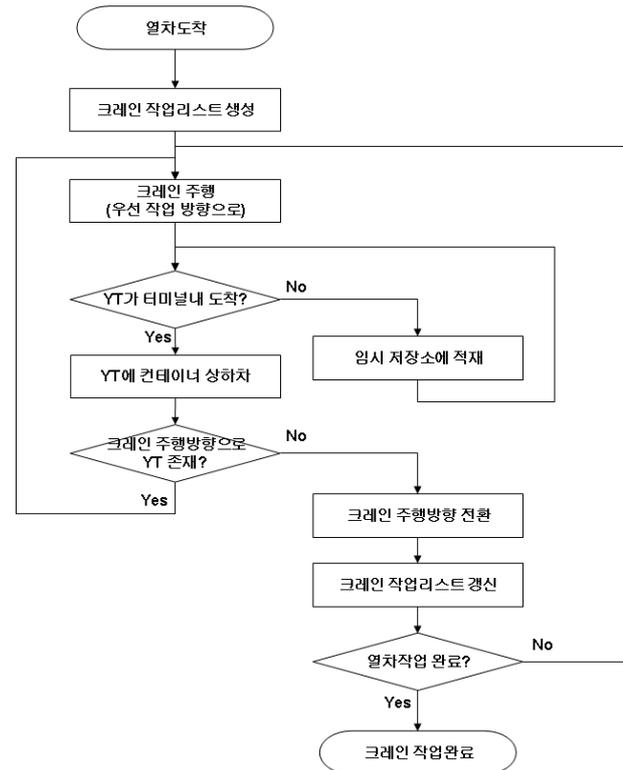


Figure 6. Operation Sequence of a Rail Crane

<Figure 6>은 크레인의 작업 순서를 보여준다. 크레인의 작업 규칙은 그 자체로 시뮬레이션을 통해 효율성을 분석해 보고 최적의 작업 규칙을 선택해야 하나 이는 본 연구의 주제에서 벗어나므로 생략하기로 한다. 다만 본 연구에서는 ‘단방향 반복운행’ 방식을 적용하기로 한다. 크레인은 한쪽 방향으로 주행하면서 주행 방향에 있는 YT에 대해 작업을 수행한다. 더 이상 작업할 YT가 없거나 이동경로의 끝까지 도착한다면 반대 방향으로 주행하면서 그 방향에 있는 YT에 대해서도 작업을 수행한다. 열차가 도착한 후, YT가 도착하기 전까지 크레인은 컨테이너를 작업선과 작업로 사이의 임시저장소에 적재하는데 이는 크레인의 가동률을 높이기 위한 것이다. 일단 YT가 도착하면 임시저장소에 적재하던 작업을 중단하고 YT 작업을 우선적으로 수행 한다. YT가 20 ft 컨테이너 2개를 동시에 수송 하였으나 두 컨테이너의 작업위치가 상이한 경우에는 크레인

이 주행하던 방향으로 컨테이너를 들고 이동하여 작업한다.

<Figure 7>은 실제 시스템 상에서 구현된 화면이다. 사용된 패키지로는 객체지향 시뮬레이션 프로그램인 eM-Plant Professional ver 7.2를 사용하였고 결과분석을 위해 Microsoft Excel을 연동하여 사용하였다.

4.2 실험의 수행

수리모형을 통해 추정되어진 설계 파라미터들의 수치는 3.2 절의 마지막에 나와 있다. 본 연구는 수리모형을 통해 추정된 수치를 기반으로 시뮬레이션을 구현하고 이 시뮬레이션의 결과를 다시 수리모형에 적용하여 파라미터 값을 지속적으로 개선시키는데 목적이 있다. 이를 위해 크게 두 가지 설계 파라미터들에 대해 보정을 수행하였다. 첫째는 크레인의 대수이고 둘째는 YT의 대수다.

우선, 수리모형을 통해 구해진 초기 설계 파라미터들의 값을 이용한 초기 시뮬레이션 모형을 통해 도출된 η 값은 42.45%이다. 이는 크레인의 소요 대수를 산정하는데 필요한 값이다. 초기 수리 모형에서는 η 값을 45%로 적용하여 크레인 대수를 1.83대로 추정하였으나 실제 시뮬레이션에서는 η 값이 42.45%로 보정되었다. 따라서 크레인의 대수는 1.94대로 보정되어진다. 그러나 실제 소요대수는 2대로 동일하게 결정되므로 유의한 차이는 없음을 알 수 있다. 마찬가지로 소요 선로수도 유의한 차이가 없음을 수식을 통해 알 수 있다(크레인의 대수는 소요 선로수의 계산에도 영향을 끼친다).

YT 소요 대수의 경우 앞에서 수식을 통해 도출된 대수를 사용하여 시뮬레이션을 수행한 결과 전체 평균 주행시간이 43분이었다. 이 수치는 수리 모형에서 YT 대수를 도출하기 위해 사용한 평균 주행시간인 31분과는 차이가 큰 수치이다. 따라서 시뮬레이션으로 도출된 평균 주행 시간을 앞의 YT 대수를 산정하는 수식에 적용하여 다시 YT의 대수를 계산해 보았다. 그 결과 도출된 YT 대수는 기존의 18대에서 25대로 늘어났다. 이를 적용해서 다시 한 번 시뮬레이션을 수행하였다. 이러한 실험의 결과는 <Table 1>로 정리하였다.

<Table 1>에서 보듯이 시뮬레이션에서 YT 대수가 늘어날 수록 평균 주행시간이 늘어나며 또한 이렇게 늘어난 평균 주행시간을 수식에 고려하면 필요한 YT의 대수의 추정치가 또

다시 증가한다. 이는 불필요하게 많은 YT 대수로 인해 발생하는 정체(congestion)로 인한 결과이다. 정체현상 때문에 평균 주행 시간이 증가하는데도 위의 이론적인 YT 소요 대수를 구하는 수식은 이를 반영하지 못하기 때문에 발생하는 현상이다. 즉, 앞에서와 같이 단순히 반복적으로 주행시간을 갱신해 가는 방식은 적정 YT 대수를 추정하는 데 사용할 수 없다는 것을 알 수 있다. 즉, YT의 대수를 구하는데 있어서 평균 주행시간을 갱신해가는 방식과는 다른 접근 방법이 필요하다.

Table 1. Comparison of Average Traveling Times

YT 소요 대수	평균 주행시간
18대	43분
25대	49.18분
29대	51.92분

본 연구에서는 적정 서비스 수준을 제공하는 최소의 YT 대수를 반복적으로 추정하는 접근 방식을 채택하고자 한다. 이러한 접근을 위해 앞에서 언급한 수리 모형에서는 고려가 되지 않았던 YT 대수에 따른 크레인의 생산성 지표를 도입하였다. 이는 식 (18)과 같이 표현하였다.

$$\text{크레인 생산성 지수} = \frac{\text{실제 생산성}}{\text{기계적 생산성}} \quad (18)$$

여기서 기계적 생산성이란 크레인의 이론적 최대 생산성을 의미한다. 즉 YT의 미도착으로 인해 발생하는 시간적 손실이 없다는 가정하에서의 최대 생산성을 의미한다. 그리고 실제 생산성이란 시뮬레이션을 통해 도출되어진 크레인의 생산성을 의미한다. 이 지표가 높다는 것은 그만큼 크레인의 작업에 있어서 YT의 미도착 등으로 인한 시간 손실이 없다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 생산성 지수라는 지표를 통해 적정 생산성 지수를 유지하는 최소 YT의 대수를 산정하고자 한다. <Figure 8>은 이를 위한 전체 절차를 표현한 것이다.

초기 추정치는 수리모형으로부터 출발한다. 따라서 실제 생산성을 파악할 수 없으므로 아래와 같은 임시 추정식을 사용하여 실제 생산성을 도출한다.

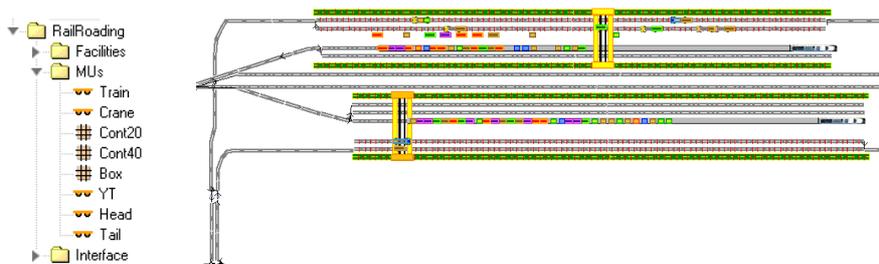


Figure 7. Captured Animation of the Simulation Program

$$\frac{YT \text{ 대수} \times \left(\frac{YT \text{ 당 평균 처리 컨테이너 수}}{기계적 생산성} \right) \times \frac{1}{YT \text{ 사이클 타임}}}{기계적 생산성} \quad (19)$$

여기서 YT의 사이클 타임은 위의 식 (15)를 이용한다. 즉, 단순 수식에서의 평균 주행시간의 추정치이다. YT 당 평균 처리 컨테이너 수는 YT가 공차운행을 하지 않고 항상 컨테이너를 상차하여 운행한다는 가정하에서의 평균 컨테이너 수를 의미한다. 즉 한 YT의 경우 40feet 컨테이너를 운반할 경우 한 개의 컨테이너를 운반하는 것이고 20feet 컨테이너를 운반할 경우 항상 2개의 컨테이너를 운반한다. 본 논문에서 TEU factor는 1.48을 적용하였다. 결과적으로 YT가 편도 주행 시 평균적으로 싣고 다니는 컨테이너 수는 1.52 개가 된다. YT가 한번 철도 운송 터미널을 왕복 주행 시 평균 처리하는 컨테이너 수는 3.04개가 된다.

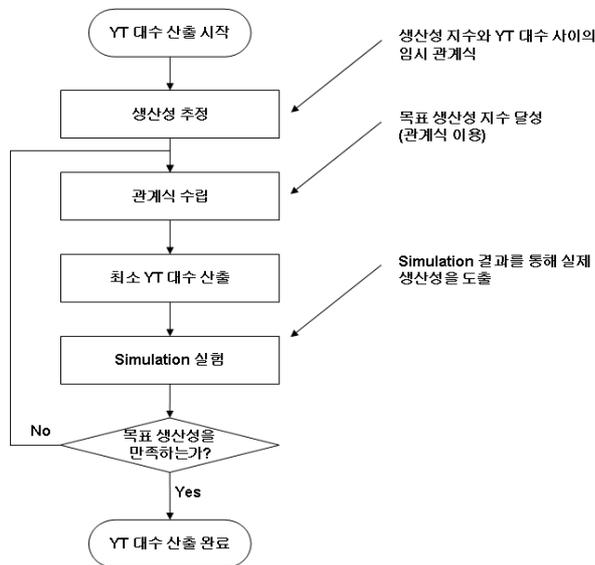


Figure 8. Estimating Procedure for the Number of YTs

식 (19)의 분자 부분은 시간당 YT들이 처리하는 총 개수를 의미한다. 실제로 크레인이 YT 작업을 수행하기 때문에 시간당 YT들의 총 컨테이너 처리 대수는 시간당 크레인의 실제 처리 능력과 일치한다. 그리고 분모 부분의 YT의 기계적 생산성은 크레인의 평균 사이클 타임을 이용하여 이론적인 최대 생산성을 적용하였다. 목표 생산성 지수는 85%로 가정하였다. 이는 실제 현장에서의 여러 상황을 고려한 경험적 수치이다. 이러한 수치를 적용하여 아래와 같이 YT의 대수를 역계산하면 YT 소요 대수는 7대 이다.

$$\frac{YT \text{ 대수} \times \left(\frac{YT \text{ 당 평균 처리 컨테이너 수}}{기계적 생산성} \right) \times \frac{1}{YT \text{ 사이클 타임}}}{기계적 생산성} = \frac{YT \text{ 대수} \times 3.04 \times \frac{1}{0.52}}{43.5} = 0.85$$

7대의 YT를 적용하여 시뮬레이션을 수행한 결과 크레인의 생산성은 시간당 16.08개였다. 이를 기계적 생산성으로 나누면 크레인 생산성 지수는 37.8%이다.

이제 이러한 크레인 생산성 지수를 이용하여 85%의 생산성을 유지하는 최소 YT 대수를 구할 수 있다. 즉, $7 : 0.378 = x : 0.85$ 라는 비례식을 이용해서 85%의 생산성 수치를 만족시키는 YT 대수를 구하면 16대라는 값을 얻는다. 이 수치를 다시 시뮬레이션에 적용하면 크레인의 생산성 지수는 67.8%이다. 이를 선형방정식으로 표현하면 아래 식 (20)과 같다. 아래 식에서 x는 YT 대수이고 y는 크레인 생산성 지수이다. 간단하게 설명하면 (7, 37.8)과 (16, 67.8)을 지나는 직선이다. 이는 <Figure 9>에서 ①의 영역이다.

$$y = 3.333x + 14.467 \quad (20)$$

위의 식 (20)을 이용하여 생산성 지수 85%를 보증하는 YT 대수 x를 구하면 22대이다. 이를 적용하여 다시 시뮬레이션을 수행하면 크레인의 실제 생산성은 79.7%이다. 시뮬레이션 결과를 이용하여 선형식을 추정하기 위하여 (16, 67.8)과 (22, 79.7)를 지나는 직선을 표현하면 아래 식 (21)과 같다. 이는 <Figure 9>에서 ②의 영역이다.

$$y = 1.983x + 36.072 \quad (21)$$

같은 방식으로 생산성 수치 85%를 보증할 수 있는 YT 대수 x를 계산하면 25대가 계산되어지고 이를 시뮬레이션에 적용해 보면 크레인의 실제 생산성은 36.79개로 나온다. 이는 84.5%의 생산성 지수를 나타낸다. 이를 선형 방정식으로 나타내면 (22, 79.7)과 (25, 84.5)를 지나는 직선이다. 이는 <Figure 9>에서 ③의 영역이다.

$$y = 1.6x + 44.5 \quad (22)$$

식 (22)를 이용하여 생산성 지수 85%를 보증할 수 있는 YT 대수 x를 계산하면 26대가 나오고 이를 시뮬레이션에 적용해 보면 실제 크레인의 생산성은 37.62개가 나온다. 이는 크레인의 생산성 지수 86.48%를 나타내므로 목표로 삼은 85%를 보증해주는 수치이다. 더 이상의 보정은 필요 없기 때문에 여기서 반복은 중단하고 YT의 대수는 26대로 결정한다. 이는 <Figure 9>에서 ④의 영역이다.

앞에서 생산성 지수를 고려하지 않고 단순 시뮬레이션 결과를 통해 YT의 대수가 수렴할 때까지 계산하던 방식에서는 YT의 대수가 29대 이상으로 증가하던 형태였다. 또한 이 방식에서는 YT의 대수가 정확하게 도출되지 않았던 것에 반해 생산성 지수라는 척도를 적용한 방식에서는 목표로 하는 생산성 수치를 보증해주는 YT의 소요 대수를 도출할 수 있다. 이는 앞의 방식이 YT의 정체 등을 고려하지 못하는 비현실적인 방식이었던 것에 반해 보다 현실적인 제약들이 고려하여 보정하는 방식이라 할 수 있다.

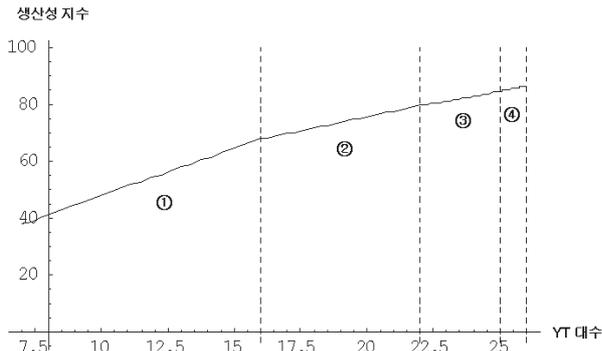


Figure 9. Relation between the number of YTs and the productivity of rail cranes

만약에 앞의 식 (19)에서 적용된 YT의 사이클 타임 중 YT의 대기 시간의 추정 값을 아주 크게 잡았다면 YT 대수를 보정하는 단계는 <Figure 9>의 영역 ①부터 보정하는 것이 아니라 영역 ④부터 보정하게 될 것이다. 실제로 우리가 알고 있는 YT의 여러 가지 입력 파라미터들이 얼마나 정확하냐에 따라서 시뮬레이션을 통한 보정의 반복 단계가 몇 번을 지속하느냐가 결정되어진다.

5. 설계 파라미터 보정에 관한 기타 논의

4.2절에서 언급했듯이 본 실험에서 추정치 보정이 필요한 파라미터는 두 가지로 볼 수 있다. 하나는 크레인의 대수이고 다른 하나는 YT 소요 대수이다.

본 연구에서는 크레인의 생산성 지수라는 지표를 도입하여 YT 소요 대수를 결정하였으나 그 이외에도 YT의 직상차 비율이나 대기 시간 등 좀 더 세부적인 지표로 나누어 생각해 볼 수 있을 것이다. 그러나 평균 주행시간은 항만 터미널에서의 대기시간, 항만 터미널과 철도운송 터미널간의 주행시간, 철도운송 터미널에서의 서비스 시간 등으로 구성되어 있으므로 평균 주행시간을 대표적인 척도로 사용한다면 이를 구성하는 다른 요소지표들까지도 종합적으로 평가할 수 있을 것으로 판단하고 실험을 수행하였다.

크레인의 대수의 경우, 본 연구의 사례에서 크레인 대수를 구하기 위해 적용된 추정 파라미터가 실제 시뮬레이션 결과와 유의한 차이가 없기에 크레인 대수의 보정은 의미가 없음을 보였다. 그러나 크레인의 경우도 추정 파라미터가 실제 시뮬레이션을 통해 얻어진 값과의 차이가 크다면 보정이 필요하다. 이러한 보정의 단계는 YT 운행 대수의 보정과 유사하게 적용되어질 수 있다. 크레인은 터미널 내 작업의 가장 핵심적인 자원이기에 본 연구에서는 크레인에 초점을 맞추어 크레인 생산성 지수라는 지표를 도입하였다. 그러나 크레인 생산성 지수 이외에도 여러 가지 성과 지표들을 적용하여 각 성과 지표들

을 비교 연구해 보는 것도 향후 연구과제가 될 수 있을 것이다.

6. 결론

본 논문에서는 새로운 철도 운송 터미널을 건설하는 것을 가정하여 철도 운송 터미널의 설계 파라미터들의 값을 추정하는 방법에 대하여 연구하였다. 우선 현장에서 사용되고 있고 간편하게 설계 파라미터들의 값을 구할 수 있는 수리 모형을 정리하였다. 또한 수리 모형에 사용 되어진 파라미터를 보정하기 위해 시뮬레이션과 수리모형을 반복적으로 이용하여 수치 값을 보정하였다. 본 연구에서 YT의 소요 대수를 추정하기 위하여 사용한 YT의 평균 주행시간의 반복적인 개선은 YT의 소요 대수 계속해서 증가시키는 단점을 가지고 있었다. 이를 보완하기 위해서 크레인 생산성 지수를 도입하여 적정 수준의 서비스 수준을 유지할 수 있는 최소 YT 대수를 산출할 수 있었다.

참고문헌

Alicke, K. (2002), Modeling and optimization of the intermodal terminal Mega Hub, *OR Spectrum*, 24(1), 1-17.

Arnold, P., Peeters, D., and Thomas, I. (2004), Modeling a rail/road intermodal transportation system, *Transportation Research Part E*, 40(3), 255-270.

Ballis, A., and Golias, J. (2002), Comparative evaluation of existing and innovative rail-road freight transport terminals, *Transportation Research Part A*, 36(7), 593-611.

Bontekoning, Y. M. (2002), *Towards new-generation terminal operations: identifying implementation obstacles*, The Netherlands TRAIL Research School Reports in Transportation Planning.

Bontekoning, Y. M., and Kreutzberger, E. (1999), *Concepts of new-generation terminal and terminal nodes*, The Netherlands TRAIL Research School Reports in Transportation Planning.

Bontekoning, Y. M. and Kreutzberger, E. (2001), *New-generation terminals : a performance evaluation study*, The Netherlands TRAIL Research School Reports in Transportation Planning.

Bontekoning, Y. M., Macharis, C., and Trip, J. J. (2004), Is a new applied transportation research field emerging?-A review of intermodal rail-truck freight transport literature, *Transportation Research Part A*, 38(1), 1-34.

Corry, P. and Kozan, E. (2006), A decision support system for intermodal train planning, *Proceedings of the Second International Intelligent Logistics Systems Conference*, February 22-23, Marriott Hotel Brisbane & Port of Brisbane Corporation, Brisbane, Australia.

Kanacilo, E. M. and Verbraeck, A. (2006), Simulation Services to support the control design of rail infrastructures, *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*, December 3-6, 2006, Portola Plaza Hotel, Monterey, California, USA.

Korea Container Terminal Authority (2006), *Trend and Analysis on Container Freight Flows in 2005*, Korea Container Terminal Authority Web Site, 8-30.

Kozan, E. (2000), Optimising container transfers at multimodal terminals, *Mathematical and Computer Modelling*, 31(11), 235-243.



정 봉 주

부산대학교 산업공학과 학사
현재: 부산대학교 산업공학과 석사과정
관심분야: 물류시스템



이 병 권

인하대학교 산업공학과 학사
인하대학교 산업공학과 석사
현재: 부산대학교 산업공학과 박사과정
관심분야: 물류시스템, 일정계획



김 갑 환

서울대학교 산업공학과 학사
한국과학기술원 산업공학과 석사
한국과학기술원 산업공학과 박사
현재: 부산대학교 산업공학과 교수
관심분야: 생산관리, 물류시스템



서 정 훈

부산대학교 산업공학과 학사
부산대학교 산업공학과 석사
현재: 부산대학교 유비쿼터스항만물류기술
연구센터 전임연구원
관심분야: 시뮬레이션, 소프트웨어 개발



박 순 오

부산대학교 산업공학과 학사
부산대학교 산업공학과 석사
현재: (주)브에엠에스솔루션스 연구원
관심분야: 시뮬레이션, 소프트웨어 개발