

시물레이션 모델을 이용한 컨테이너 터미널 안벽능력 분석

(A study on the Quay Capacity at the Container Terminal Using Simulation Model)

김창곤, 양창호, 윤동한, 최종희, 배종욱
(한국해양수산개발원 항만시스템연구실)

Abstract

본 연구에서는 컨테이너 터미널의 적정 안벽능력(Quay Capacity)을 분석하기 위한 시물레이션 모델을 구축하였다. 모델에서는 선박의 터미널 도착 특성, 선박별 양하량 및 적하량, 컨테이너 크레인(Container Crane, C/C) 생산성 및 투입대수 등을 입력변수로 입력하였으며, 시물레이션 결과로써는 안벽점유율, 선석 점유율, 대기시간 비율, 대기비율, *Norm time* 초과비율 등을 출력하였다. 이중 컨테이너 터미널의 평가지표로는 *Norm time* 초과비율, 대기비율 및 안벽점유율을 적용하였다. 컨테이너 터미널을 운영중인 터미널의 터미널 운영실적 자료를 이용하여 모델의 확인 및 검증을 실하였다. 모델은 Knowledge Base에 근거하여 수행되는 G2를 이용하여 구축하였다.

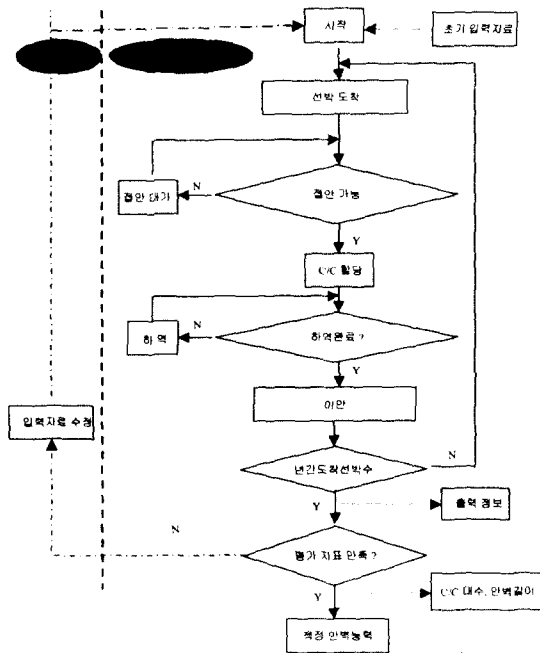
1. 개요

컨테이너 터미널은 해상 물류와 육상물류의 접점이 이루어지는 물류기지이다. 선박은 선사별, 항로별 배선계획에 따라 터미널에 도착하여 수입 컨테이너를 양하하고 수출 컨테이너를 적하한다. 그리고 수출 컨테이너는 선박 출항시각에 맞추어 게이트(철송화물 포함)를 통해 반입되고, 수입 컨테이너는 선박으로부터 양하된 후 게이트를 통해 반출된다. 터미널

에 도착한 컨테이너는 안벽에서의 양적하 시각과 게이트에서의 반출입 시각 사이에서는 터미널 장치장에 장치된다. 따라서 컨테이너 터미널의 능력은 안벽(Quay side)에서의 양·적하 능력, 장치장의 장치능력 및 게이트에서의 트럭에 대한 서비스 능력에 따라 달라진다. 본 연구에서는 특히 안벽에서의 연간 적정능력을 분석하는데 주안하였다.

2. 모델의 구성

시물레이션 모델은 크게 선박 도착 구현, 안벽에서의 접안위치 구현, 선박별 C/C 할당으로 구성되어 있다(〈그림 1〉).

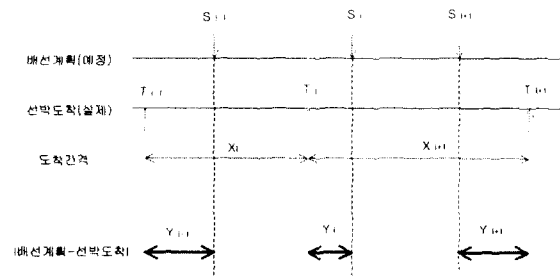


〈그림 1〉 시물레이션 구성

2.1 컨테이너선의 도착 특성

컨테이너선은 선사별 항로별 배선계획에 의하여 특정 터미널에 도착한다. 따라서 특정 터미널의 입장에서는 각 선박의 입항예정 시각을 예측할 수 있다.

선사는 운행 선박에 대해서 1년 또는 1개월 단위의 계획을 수립하면서 특정 터미널에 대해서 일정한 간격으로 도착하도록 일정을 작성한다. 따라서 시물레이션 모델에서는 계획적인 도착에 대해 변동을 부여하여 선박의 도착시각을 생성시킴으로써 선박이 일정 간격에 의하여 도착하도록 계획이 수립된다는 특성을 반영하였다. 그러나 배선계획에 의한 특정 터미널 입항예정시각에 대해서 항로 기상상태, 출항지에서의 일정 조정 등에 따라 실제 터미널에 도착하는 시각은 배선계획에 의한 입항예정 시각과 차이가 발생한다.



〈그림 2〉 컨테이너선 도착 특성

〈그림 2〉에서 S_i , T_i 는 각각 i 번째 항차의 배선계획에 의한 터미널 도착예정 시각과 실제 터미널 도착시각을 나타낸다. 지금까지의 많은 국내 연구에서는 컨테이너 터미널의 선박도착간격 $T_i - T_{i-1}$ 를 확률변수 X 로 정의하여왔다. 본 연구에서는 선박도착 시각을 구현하기 위해서 위와 같은 선박도착간격 보다는 배선계획에 의한 입항 예정 시각과 실제도착시각과의 차이 $|S_i - T_i|$ 를 확률변수 Y 로 정의하였다(부산 신항만을 설계한 JWD (Jordan Wood man Dobson)와 KPC(Korean Port Consultants)도 이와 같은 방법으로 선박도착 분포를 구현). 확률변수가 Y 가 이와 같이 정의되면, 시물레이션 내에서 배선계획에 따른 i 항차의 도착시각 T_i 는 $S_i \pm Y_i$ 으로 구현된다. 이러한 가정에서 선박이 특정 선사의 배선계획에 의하여 특정 터미널에 도착하는 입항예정시각 S 와 실제도착시각과 T 의 차이 Y 가 모수 $(0, D)$ 를 갖는 일양분포를 따른다면, 선박도착 시각은 다음과 같이 구현할 수 있다.

$$\text{선박도착시각} = S \pm \text{Uniform}(0, D)$$

2.2 접안위치 결정(서어버 선택)

묘박지에 대기 중인 선박에 대해서 안벽의 접안위치를 결정하는 것은 접안을 고려중인 선박의 길이, 유희중인

공간의 길이, 양적하 컨테이너의 장치장 위치, C/C 운영 상태들을 종합적으로 고려하여 검토하여야 한다. 수심 등 물리적 조건이 전체 안벽에 걸쳐서 모두 같다면 안벽을 선석으로 구분하는 것은 의미가 없으나, 안벽을 몇 개의 선석별로 또는 C/C운영 상태별로 구분하여 터미널 운영계획을 수립하고 있다.

가) 선석 구분이 있는 경우

- ① 유티선석
- ② 선박에 할당될 C/C 대수보다 유티 C/C가 많은 선석중, 선박에 할당될 C/C 대수에 가장 가까운 유티 C/C가 있는 선석
- ③ 유티 C/C가 가장 많은 선석
- ④ 가장 빨리 작업완료가 예상되는 선석의 인근 선석 (접안은 하였으나 유티 C/C가 없어 작업대기 가능성 존재)

나) 선석 구분이 없는 경우

- ① 접안을 검토중인 i 선박 길이를 기준으로 하여 접안 가능한 유티 공간 찾을
- ② 접안 가능한 유티 공간이 없으면 접안 대기
- ③ i 선박에 할당해야 할 C/C 대수 QC_i 계산
- ④ 모든 유티공간의 유티 C/C 대수 FQ_j 가 0이면 작업완료가 가장 빨리 예상되는 인근 위치에 접안 ($FQ_j : j^{th}$ 유티공간에서 작업 가능한 유티 C/C 대수)
- ⑤ ΔQC 가 0 +, -의 순서로 접안 가능한 유티공간 찾을

$$\Delta QC = |QC_i - FQ_j|$$

- ⑥ 동률의 ΔQC 가 존재하면 유티공간이 적은 공간에 접안

2.3 선박별 C/C 할당

선박별 C/C 할당은 선박의 접안시점과 이안시점에 결정해야 할 사항이다. 접안 선박에 대해서는 유티 C/C 중 몇 대의 C/C를 할당할 것인가를 결정해야 하고, 이안시점에는 이안 선박에 할당되어 작업을 완료한 C/C를 현재 작업중인 선박 중 어느 선박에 할당할 것인지 또는 대기시킬 것인지를 결정해야 한다.

C/C 운영 전략

- 선박의 LPC(Lift Per Call)별 C/C 할당 기준 대수 QC_i 가 정해져 있음
- 선박의 이안 사건이 발생할 때마다 C/C 할당을 재검토

그러나 앞에서 언급한 것처럼 선박의 접안위치를 결정할 때 이미 C/C 운영 전략을 동시에 고려하여 C/C가 할당되었기 때문에, 양·적하 작업을 완료하고 선박이 이안하는 시점에 이안 선박에 할당된 C/C를 어느 선박에 할당할 것인가를 결정하는 문제로 귀결된다. 이때는 현재 작업중인 선박 중 할당되어야 할 C/C 대수가 충분히 할당되지 못하고 작업중인 선박에 대해서 추가로 C/C 할당을 검토하여야 한다. 이때 C/C의 물리적 이동 공간 및 거리도 고려하여야 한다. 그러나 접안 위치를 결정할 때 가장 최근에 이안이 예상되는 지점의 인접한 지점에 선박을 접안 시켰기 때문에 이안 선박 주위에서 작업중인 선박에 대해서만 추가로 C/C를 할당하는 것을 검토한다.

3. 시물레이션 수행

3.1 컨테이너 터미널의 평가 지표

컨테이너 터미널의 적정 안벽능력을 분석하기위한 평가 지표는 선박재항시간, 선박 생산성, 선석 점유율, 대기시간비율, 대기비율 등 여러 종류의 평가지표가 있으나, 본 연구에서는 Norm time 초과비율 5%, 대기비율

1%을 주요 평가지표로 채택하였다. Norm time은 LPC에 따른 양적하 작업시간 기준이다.

$$Norm\ time\ 초과\ 비율 = \sum \frac{I_i}{\text{총 선박수}}$$

$$여기서\ I_i = \begin{cases} 1, & \text{if 작업 시간}_i - Norm\ time_i > 0 \\ 0, & \text{else if} \end{cases}$$

또한 대기비율은 선박이 터미널에 도착한 시점에 집안 할 유희공간이 없어서 대기하는 선박 수의 비율로써 1%를 기준으로 하였다.

$$\text{대기비율} = \text{대기 선박 수} / \text{총 도착 선박수}$$

즉 터미널에 도착하는 총 선박 중, 기준 양적하 작업을 초과하여 작업한 선박 수 비율과 묘박지에 대기하는 선박 수 비율이 각각 5%, 1% 이내가 되도록 하는 컨테이너 터미널의 소요 안벽 길이와 소요 C/C 대수를 선정하였고 이때의 처리 물동량을 컨테이너 터미널의 적정 능력으로 산정하였다.

3.2 시물레이션결과

1) 시나리오 구성

총 안벽길이는 1,200m, 연간물동량 기준 120만TEU(80만 lifts), C/C 생산성은 20lifts/hr로 하고, 선형구분은 LPC, 길이에 따라 3종류로 구분하여 각 선형에 따라 할당 C/C 대수를 차별화 하였다.

<표 1> 시나리오 구성

선형	LPC			선박길이 (m)		구성 비율	C/C할당	
	최대	최소	평균	최소	최대		최소	최대
A	2000	1750	1875			11%	4	5
B	1750	800	1275	150	300	15%	3	4
C	800	600	600			74%	2	3

2) 선박도착분포

배선계획에 의한 입항예정시각과 실제 도착시각과의 차이를 확률변수로 정의하여 변동폭은 국내 컨테이너 터미널의 항로별 운항실적을 참고하여 변동폭은 각각 11시간과 6.5시간으로 하였다.

3) Warming-up 기간

선박은 항로별로 주간 단위의 배선계획을 수립하고 각 컨테이너 터미널도 주간 단위의 운영계획을 수립하기 때문에 warming-up 기간은 1주간으로 설정하였으며, 시물레이션 총 수행시간은 warming-up기간을 포함하여 9주간으로 설정하였다.

4) 시물레이션 결과

<표 1>과 같은 시나리오에 의해서 배선계획에 의한 입항예정시각과 실제 도착시각과의 차이를 6.5시간, 11시간으로 가정하여 시물레이션을 수행한 결과는 <표 2>, <표 3>과 같다. 시물레이션 결과는 연간작업량, 안벽(선석)점유율, 대기비율 및 Norm time 초과비율을 제시하고 있다.

<표 2> 시물레이션 수행결과(변동폭 6.5시간)

실험 번호	연 간 작업량 (TEU)	선박별 작업량 (LPC)	선박당 접안시간 (분)	선석(안벽) 점유율	대기 척수 비 율	Norm-time 초과비율
1	121,116	843.8	836.4	0.444 (0.307)	0.076	0.054
2	124,966	861.5	846.9	0.451 (0.318)	0.145	0.032
3	117,599	832.9	824.1	0.430 (0.301)	0.094	0.039
4	114,114	808.3	817.1	0.423 (0.290)	0.044	0.017
5	126,376	865.3	860.5	0.454 (0.319)	0.142	0.049
6	119,251	835.4	832.7	0.436 (0.306)	0.109	0.049
7	119,728	844.2	826.8	0.437 (0.307)	0.060	0.022
8	114,734	803.8	809.6	0.424 (0.310)	0.087	0.011
9	119,108	834.4	830.3	0.437 (0.310)	0.066	0.033
10	116,981	824.0	832.8	0.436 (0.312)	0.071	0.038
11	119,400	836.4	831.7	0.437 (0.307)	0.089	0.034

<표 3> 시물레이션 수행결과(변동폭 11시간)

실험 번호	연 간 작업량 (TEU)	선박별 작업량 (LPC)	선박당 접안시간 (분)	선석(안벽) 점유율	대기비율	Norm-time 초과비율
1	121,116	843.8	841.4	0.445 (0.308)	0.114	0.065
2	124,966	861.6	845.4	0.451 (0.317)	0.134	0.038
3	117,599	833.0	823.7	0.430 (0.301)	0.127	0.033
4	114,114	808.3	820.9	0.427 (0.297)	0.033	0.033
5	126,376	865.3	865.0	0.457 (0.322)	0.169	0.049
6	119,251	835.4	835.3	0.435 (0.306)	0.169	0.044
7	119,728	844.2	829.7	0.440 (0.309)	0.120	0.033
8	114,734	803.8	821.4	0.429 (0.303)	0.104	0.044
9	119,108	834.4	836.5	0.439 (0.311)	0.077	0.060
10	116,981	824.0	824.9	0.431 (0.308)	0.117	0.044
11	119,400	836.4	834.4	0.438 (0.308)	0.103	0.044

시물레이션 입력자료는 A 터미널의 운영실적자료 이용하여 시나리오를 구성하였다. 연간 물동량은 80만 lifts로 가정하여 선박 도착간격 분포를 구현하였는데 시물레이션 수행결과에서도 약 79.6만 lifts를 처리하여 실제 상황과 거의 일치함을 알 수 있다. 또한 A 터미널의 선박당 접안시간은 12.1시간, 시물레이션 결과는 13.8시간으로써 1.7시간의 차이가 발생하고 있다. 이는 입력자료로 사용한 시간당 C/C 생산성 20lifts가 과소 평가되었

다가 또는 선박별 C/C 할당 대수가 전체적으로 적게 할당되었기 때문일 수도 있다. 그리고 A 터미널이 발표한 선석점유율은 42.7%, 시물레이션결과로 제시한 선석 점유율은 43.8%를 나타내고 있다. 또한 A 터미널이 발표하지는 않았지만 안벽을 선석별로 구분하지 않은 안벽점유율은 30.8%로 선석점유율보다 적게 나타나고 있다. 또한 총 도착선박중 10.3%의 선박이 도착 즉시 접안하지 못하고 대기하였으며, 3.9%의 선박이 선박별 LPC에 따른 Norm time을 초과하였음을 알 수 있다(<표 4>참조).

<표 4> 시물레이션결과와 운영실적치 비교

항목	A터미널의 1999년도 실적치	시물레이션 수행결과
연간 하역량	80만 lifts	79.6만 lifts
선박당 평균 하역량	843 lifts	836.4 lifts
선박당 접안 시간	12.1시간	13.8시간
선석 점유율	42.1%	43.8
안벽 점유율	-	30.8
대기비율	-	10.3%
Norm time 초과비율	-	3.9%

4. 결론

컨테이너 터미널의 능력은 안벽, 장치장 및 게이트의 여건에 따라 달라진다. 그러나 터미널의 주요 고객은 선박으로써 일차적으로 선박에 대한 목표 서비스 수준을 달성하기 위한 안벽능력을 설계하고 이차적으로 장치장 및 게이트의 능력을 설계한다. 본 연구에서도 안벽능력이 곧 컨테이너 터미널의 능력이라는 전제하에 안벽능력 분석을 위한 시물레이션 모델을 구축하였다. 본 연구의 후속 과제로써 컨테이너 터미널의 안벽, 장치장 및 게이트를 포함한 통합 시물레이션 모델 구축사업이 진행되어야 한다.

참고문헌

- [1] 김창곤, "컨테이너 터미널의 서비스 수준 평가지표에 대한 고찰", 「해양정책연구」, 제15권, 제1호, pp. 39-57, 2000.
- [2] 임봉택, 이재원, 성경빈, 이철영, "시뮬레이션에 의한 컨테이너 물류시스템의 분석에 관한 연구(BCTOC를 중심으로)", 「한국항만학회 98추계학술대회논문집」, pp. 107-115, 1998.
- [3] 윤원영, 안창근, 최용석, 김갑환, "시뮬레이션을 이용한 컨테이너 터미널의 운영계획 평가", 「한국시뮬레이션학회 논문지」, 제7권, 제2호, pp. 91-104, 1998.
- [4] Chung, Y., Randhawa, S. U., and Edward, D., "A simulation analysis for transtainer-based container handling facility", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 14, No 2, pp. 113-125, 1988.
- [5] Gambardella, L. M., Rizzoli, A. E., and Zaffalon, M., "Simulation and Planning of Intermodal Container Terminal". *Simulation*, Vol. 71, No. 2, pp. 107-116, 1998.
- [6] Hauth, Y., Pollatsch, M. A., and Roll, Y., "Building A Port simulator". *Simulation*, Vol. 63, No. 3, pp. 179-189, 1994.
- [7] Jordan Woodman Dobson, *Pusan Newport Container Terminal Development*, Pusan New Port, 1998.
- [8] Kim, K. H. and Kim, K. Y., "An optimal routing algorithm for a transfer crane in port container terminals", *Transportation Science*, Vol. 33, No. 1, pp. 17-33, 1999.
- [9] Korean Port Consultants, *Pusan Newport Terminal Planning Study*, Pusan New Port, 1998.
- [10] Merkurjev, Y. et al., "A Modeling and Simulation Methodology for Managing the Riga harbour container Terminal", *Simulation*, Vol. 71, No. 2, pp. 84-95, 1998.
- [11] Ramani, K. V., "An Interactive Simulation Model for the Logistics Planning of Container Operations in Seaports", *Simulation*, Vol. 66, No. 5, pp. 292-300, 1996.
- [12] UNCTAD, *Berth throughput*, UNITED NATIONS, New York, 1973.