IE Interfaces
Vol. 20, No. 4, pp. 498-503, December 2007.

컨테이너 터미널의 야드 트럭의 최적 대수와 최적 운행을 위한 해석 모형

김기영†

동서대학교 국제관계학부 물류유통학전공

Analytical Models for the Optimal Number and the Optimal Operation of Yard Trucks in Container Terminal

Ki Young Kim

Department of International Logistics, Division of International Relations, Dongseo University

The synchronized operation of a quay crane(QC) and a transfer crane(TC) increases the productivity of a container terminal. In this paper, analytical models are suggested for the optimal number and the optimal operation of the yard trucks (YTs) which travel between a quay crane and a transfer crane in a container terminal. YT may represent yard tractor, AGV and shuttle carrier. The analytical models are so simple and useful that the analysis and the results of this paper can be used not only in container terminal practices but also in many other application fields.

Keyword: quay crane, transfer crane, yard truck, transport, shuttle

1. 서 론

컨테이너 터미널에서 이루어지는 본선 작업은 장치장에 있는 컨테이너를 선박에 싣거나 선박에 있는 컨테이너를 내려서 장치장에 장치하는 것이다. 컨테이너를 선박에 싣거나 내리는 작업은 키 크레인(Quay Crane, QC)이 담당한다. 컨테이너를 장치장에 장치하거나 인출하는 작업은 트랜스퍼 크레인(Transfer Crane, TC)이 담당한다. QC와 TC 간에 컨테이너를 운송하는 것은 야드 트럭(Yard Truck, YT)이 담당한다. 본 논문에서 YT라 함은 야드 트랙터(yard tractor), 무인운반차(Automated Guided Vehicle, AGV), 셔틀 캐리어(shuttle carrier)를 포괄적으로 의미한다.

본 연구에서는 QC와 TC 간에 컨테이너를 운송하는 YT의 최적 대수와 최적 운행을 해석학적으로 결정하는 문제를 다룬다.

본 논문과 관련된 연구로는 다음과 같은 연구가 있다. Lia and Lam(1994)은 홍콩에 있는 어느 야드의 데이터를 바탕으로 시뮬레이션 모형을 구축하고 야드 트랙터의 수에 따른 컨테이너 시간당 처리량, 키 크레인과 트랜스퍼 크레인의 활용도, 야드 트랙터의 대기시간의 관계를 시뮬레이션을 통해 찾아 보았다. 김갑환, 왕기홍(1997)은 컨테이너 터미널에서 키 크레인, 트랜스퍼 크레인, 야드 트랙터에 대해 상태를 정의하고 안정화된 상태에서 각 장비들의 상태 확률을 이용하여 각 장비의 처리능력을 평가하는 추계적 모형을 제시하고 야드 트랙터의 수에 따른 시간당 컨테이너 처리 개수를 구해 그 결과를 시뮬레이션과 비교하였다. 최용석 외(2004)는 키 크레인과 트랜스퍼 크레인 사이의 컨테이너 운송을 담당하는 야드 트랙터의 대수를 결정하기 위한 시뮬레이션을 실시하였다. 하태영 외(2004)는 키 크레인과 트랜스퍼 크레인 사이의 컨테이너 운송을 담당하는 AGV 대수에 따른 생산성을 분석하기 위해 시뮬레이션을 실시하였다. 하태영, 최용석(2005)은 키 크레인과 트랜스퍼 크레인 사이의 컨테이너 운송에 자체 하역 기능을 갖춘 장비

†연락저자 : 김기영 교수, 617-716 부산광역시 사상구 주례2동 산69-1 동서대학교 국제관계학부 물류유통학전공, Fax : 051-320-1630, E-mail : kiykim@gdsu.dongseo.ac.kr
2007년 04월 접수, 2회 수정 후 2007년 07월 게재확정.

인 셔틀 캐리어가 이용될 경우 해당 장비에 대한 생산성을 시뮬레이션을 통해 AGV를 사용할 경우와 비교하였다. Cetinkaya (2006)은 두 기계 사이에 하나의 운반 장비가 이용되는 경우에 트랜스퍼 배치 스케쥴링 문제를 다루고 있다.

위의 연구들은 야드 트랙터, AGV 그리고 셔틀 캐리어의 생산성이나 대수를 추정하기 위해 추계적 모형이나 시뮬레이션을 이용하였다. 본 논문은 QC와 TC 사이를 운행하는 YT를 해석하여 그 최적 대수와 최적 운행을 결정한다는 점에서 기존 연구와 큰 차이를 보인다.

본 논문의 제 2장에서는 QC와 TC의 컨테이너 취급시간이 일정한 경우 YT의 최적 대수와 최적 운행을 결정한다. 제 3장에서는 QC와 TC의 컨테이너 취급시간이 변동할 경우에 YT의 최적 대수와 최적 운행을 결정한다. 마지막으로 제 4장에서는 결론을 제시한다.

2. 컨테이너 취급시간이 일정할 경우 YT의 최적 대수와 최적 운행을 위한 모형

일반적으로 수입 컨테이너들은 QC에 의해 하역된 후 YT에 의해 운반되어 수입 컨테이너 장치장에 있는 TC에게 전달되어 수입 컨테이너 장치장에 장치된다. 이후 장치장에 장치된 수입 컨테이너들은 외부트럭(Outside truck, OT)에 의해 화주에서 전달된다.

일반적으로 수출 컨테이너들은 OT에 의해 운송되어 수출 컨테이너 장치장에 있는 TC에게 전달되어 수출 컨테이너 장치장에 장치된다. 해당 수출 컨테이너들을 실을 선박이 입항하여 선적작업이 시작되면 수출 장치장에 있는 컨테이너들은 TC에 의해 YT에 실리어 QC에 전달되고 이후 선박의 지정된 장소에 적재된다.

<그림 1>은 장치장의 TC와 QC간의 운행하는 YT의 이동을 간단한 형식으로 보여 주고 있다.

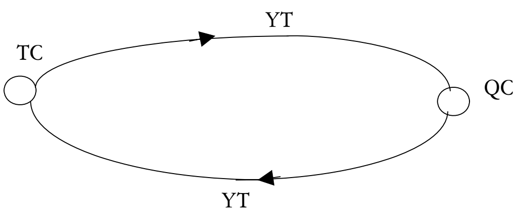

그림 1. TC와 QC 간의 운행하는 YT의 이동 형태의 예

먼저, 본 절에서 도입되는 가정은 다음과 같다.

첫째, TC의 컨테이너 취급시간은 일정하고 확정적이다.

둘째, QC의 컨테이너 취급시간은 일정하고 확정적이다.

셋째, YT에서 컨테이너를 싣거나 내리는 시간은 0이라고 가정한다.

본 절에서 다루게 될 모형의 입력 데이터와 관련된 기호는 다음과 같다.

d_{tq} = TC에서 QC까지의 거리
d_{qt} = QC에서 TC까지의 거리
v_m = YT의 운행 가능한 최대 속도
S_t = TC의 컨테이너 취급시간
S_q = QC의 컨테이너 취급시간

TC에서 QC까지의 이동시간과 QC에서 TC까지의 이동시간은 각각 다음과 같다.

$$T_{tq} = \frac{d_{tq}}{v_m} \tag{1}$$

$$T_{qt} = \frac{d_{qt}}{v_m} \tag{2}$$

식 (1)과 식 (2)의 합에 해당하는 길이 ($T_{qt}+T_{tq}$)를 원주로 하는 원을 <그림 2>와 같이 만들 수 있다. 이 원의 원주 상에 TC와 QC의 위치를 잡고 YT의 운행시간 간격의 초안을 다음과 같이 만들 수 있다.

$S_q \geq S_t$인 경우에 대해서는 YT가 QC에서 대기하지 않지 않도록 YT의 운행시간 간격을 S_q에 맞추어 동기화시키면 <그림 2>의 음영구간에 해당하는 시간 만큼 QC가 유휴시간을 가지게 된다.

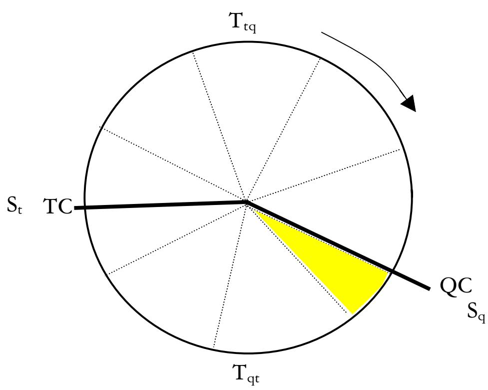

그림 2. YT 운행시간 간격의 초안의 예

일반적으로 컨테이너 터미널에서 선적작업이나 하역작업 중에 YT가 부족해서 QC가 유휴시간을 가지는 경우를 피한다. 본 논문에서는 그림 2의 경우처럼 QC에서 유휴시간이 발생하면 초안의 YT의 대수에서 음영구간에 1대를 추가시킨다. 그리고 YT들이 운행할 때 음영구간에 도착하게 되는 YT는 그 속도가 운행 가능한 최대 속도가 아니라 최적인 값으로 운행하여 음영구간의 시간 간격이 S_q가 되도록 맞춘다.

이 경우 YT의 대기가 발생하지 않으면서 QC의 유휴시간이 영(생산성이 최대화)이 되며 YT의 대수도 최소가 된다.

$S_q \le S_t$인 경우에도 비슷하게 해석할 수 있다. 다만 이 경우에서는 TC의 유휴시간이 영이 되고 이 조건하에서는 YT를 더 투입하더라도 TC의 컨테이너 취급시간 때문에 QC의 생산성은 더 향상되지 않는다.

이상의 논리에 의해 YT의 최적 대수는 다음과 같이 표현된다.

$$n = f_s\left(\frac{T_{tq} + T_{qt}}{\max[S_t, S_q]}\right) \tag{3}$$

단, $b = f_s(a)$에서 b는 a와 같거나 큰 처음의 정수

이 때 YT의 최적 운행시간 간격은 다음과 같다.

$$I = \max[S_t, S_q] \tag{4}$$

YT의 최적 속도는 두 종류로 나누어진다. 흰 구간에 도착한 YT의 최적 속도는 v_m이 되고, 음영구간에 도착한 YT의 최적 속도는 다음과 같이 된다.

$$v_s = \frac{d_{tq} + d_{qt}}{I} - (n-1)\, v_m \tag{5}$$

현실적으로는 음영구간 만큼의 시간이 경과되도록 YT의 속도를 낮추거나 멈추는 것은 혼란스러울 수 있으므로 투입되는 전체 YT들의 속도를 균등하게 낮추어 운행하는 방법을 생각할 수 있다. 이 경우 YT들의 최적 균등 운행속도는 다음과 같이 표현된다.

$$v = \frac{d_{tq} + d_{qt}}{n \times \max[S_t, S_q]} \tag{6}$$

식 (3)~식 (6)의 결과에서 알 수 있듯이 본 연구와 기존연구와의 큰 차이점은 다음과 같다. 기존연구에서는 야드 트랙터가 키 크레인이나 트랜스퍼 크레인에 도착하는 사건을 관리할 수 없는 변수처럼 취급하였다. 반면에 본 연구에서는 YT가 컨테이너 터미널 내부에서 운행되므로 QC나 TC에 YT가 도착하는 사건을 YT의 운행시간 간격(YT의 속도)의 조정을 통해 관리할 수 있다고 보고 있다. 이 차이점에 의해 가정된 확률분포에 의해 랜덤하게 발생하는 도착사건에 바탕을 둔 시뮬레이션이나 대기이론 접근방법과 기본 생각을 달리하고 있다.

2.1 수치예제

본 예제의 입력 데이터는 다음과 같이 가정한다.

$d_{tq} = 600m$

$d_{qt} = 900m$

$v_m = 300m/min$

$S_t = 2.4min/unit$

$S_q = 2min/unit$

이상의 입력 데이터에 대해서 최적의 YT 대수와 최적의 YT 운행을 결정해 보면 다음과 같다. 먼저, TC에서 QC까지의 이동시간과 QC에서 TC까지의 이동시간은 다음과 같다.

$$T_{tq} = \frac{600m}{300m/\min} = 2\min$$
$$T_{qt} = \frac{900m}{300m/\min} = 3\min$$

YT의 최적 대수는 다음과 같다.

$$n = f_s\left(\frac{2+3}{2.4}\right) = I(2.083) = 3$$

YT의 최적 운행간격은 다음과 같다.

$$I = S_t = 2.4(\min)$$

TC에서 컨테이너를 전달받거나 전달한 직후 YT가 QC로 향하는 음영구간인 60m를 이동하는 구간에 해당하는 YT의 최적 속도는 다음과 같다.

$$v_s = \frac{600+900}{2.4} - (3-1) \times 300 = 25m/\min$$

나머지 구간에서의 2대의 YT의 속도는 각각 300m/min가 된다. 참고로, YT들의 최적 균등 운행속도는 다음과 같다.

$$v = \frac{600+900}{3 \times 2.4} = 208.33(m/\min)$$

여기서 본 논문에서 사용된 YT의 최적 대수의 의미를 살펴보자. 먼저 컨테이너 개당 취급가격은 10000원, YT의 시간당 투입비용은 50000원으로 가정하자.

가정된 이익과 비용을 도입한 후 예제 2.1에서 한계분석을 적용하면 <표 1>과 같은 결과를 얻을 수 있고 경제적 의미에서의 최적의 YT의 대수는 2대가 될 것이다.

표 1. YT의 투입대수에 따른 산출 결과

YT대수	컨테이너 처리량	한계처리량 (한계생산)	한계이익 (천원)	한계비용 (천원)	한계이윤 (천원)
0	0				
		12	120	50	70
1	12				
		11	110	50	60
2	23				
		2	20	50	-30
3	25				
		0	0	50	-50
4	25				

그러나 YT의 대수를 이익과 비용의 관점으로만 구하기 어려운 이유는 다음과 같다. 첫째, 현실적으로 컨테이너 터미널

에서는 선적이나 하역작업을 할 때 YT의 대수가 부족해서 QC나 TC에 유휴시간이 생기는 것을 피한다. 이것은 YT의 대수가 부족해서 선적작업이나 하역작업의 완료시간이 늘어나는 것을 피하기 위함이다. 둘째, YT의 컨테이너 운반은 컨테이너 터미널에서 컨테이너 취급의 일부 활동에 불과하므로 현실적으로 컨테이너 취급에 따른 이익의 추정이 어렵고 또한 YT의 운영에 따른 비용도 추정하기 다소 어렵다. 셋째, YT의 대수에 따른 한계분석으로 문제를 접근하더라도 여러 장비와 장치공간이 협력하여 이윤을 창출하는 컨테이너 터미널에서 YT의 한계이윤 입장에서 YT의 대수를 결정하는 것은 너무 협소한 관점이다.

이상의 세 가지의 현실적인 이유로 본 논문에서는 한계처리량이 0이 되는 3대가 YT의 최적 대수로 정의한다. 이때의 YT의 대수는 선적작업이나 하역작업의 생산성을 최대화시키므로 단순히 최소의 YT의 대수라고 부르기 보다는 최적의 YT의 대수라고 부르는 것이 더 적합한 용어의 사용일 것이라 판단된다.

3. 컨테이너 취급시간이 변동할 경우 YT의 최적 대수와 최적 운행을 위한 모형

본 절에서 추가적으로 사용되는 기호를 다음과 같다.

X = TC의 컨테이너 취급시간(확률변수)

Y = QC의 컨테이너 취급시간(확률변수)

<그림 3>은 TC와 QC의 컨테이너 취급시간인 X와 Y, YT의 이동시간인 T_{qt}와 T_{tq}를 원상에 배치한 것을 보여 주고 있다. 이 원을 본 논문에서는 운행시간원이라 부르겠다.

<그림 3>에 대한 평균 운행시간원은 원주의 길이가 E[X] + E[Y] + T_{tq} + T_{qt}가 되는 원이다. 이 원의 반지름은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$r_0 = \frac{E[X] + E[Y] + T_{tq} + T_{qt}}{2\pi} \tag{7}$$

평균 운행시간원에서 TC의 컨테이너 취급시간, QC의 컨테이너 취급시간, TC에서 QC까지의 이동시간, QC에서 TC까지의 이동시간의 크기는 각도 Θ_t, Θ_q, Θ_{tq}, Θ_{qt}을 이용해서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\theta_t = \frac{E[X]}{r_0} \tag{8}$$

$$\theta_q = \frac{E[Y]}{r_0} \tag{9}$$

$$\theta_{tq} = \frac{T_{tq}}{r_0} \tag{10}$$

$$\theta_{qt} = \frac{T_{qt}}{r_0} \tag{11}$$

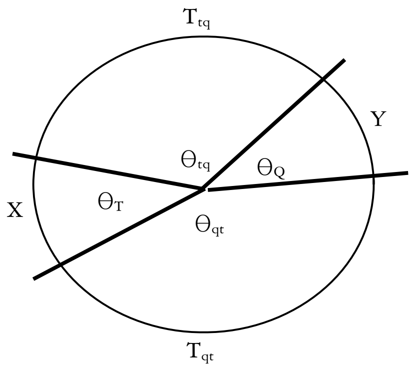

그림 3. TC, QC 그리고 YT에 대한 운행시간원

QC와 TC의 컨테이너 취급시간 X와 Y는 각각 임의의 확률밀도 함수를 따른다고 하자. 그러면 운영상에서 QC와 TC의 컨테이너 취급시간은 X_i와 Y_j로 나타낼 수 있다. 예를 들어, <그림 4>에서 Y가 균일분포 U($r_a\Theta_q$, $r_b\Theta_q$)를 따른다고 할 때 QC의 운영상에서의 컨테이너 취급시간은 Y_1, Y_2, Y_3, ⋯, Y_n과 같이 표현된다.

TC와 QC의 컨테이너 취급시간이 변동된다고 할 때, TC와 QC의 유휴시간이 발생하지 않으면서 또한 YT의 대기가 발생하지 않으려면 TC와 QC의 컨테이너 취급시간의 변동시간에 YT의 운행시간 간격을 일치시키는 것을 생각해 볼 수 있다. 예를 들어, QC의 컨테이너 취급시간이 차례대로 Y_1, Y_2, Y_3이면 YT의 운행시간 간격도 차례대로 Y_1, Y_2, Y_3과 같은 방식이다.

각각의 YT의 운행시간 간격은 <그림 4>처럼 평균 운행시간원의 동심원들 상의 원주의 길이로 표현할 수 있다. 다행히도 개별 동심원상의 원주의 길이는 변하더라도 그 길이에 관계없이 그 각도는 변하지 않는다. 이 성질을 이용하면 YT의 최적 대수를 구할 수 있다.

X와 Y의 값이 변동할 때 각각의 YT의 운행시간 간격은 개별 동심원상의 원주의 길이(I_j와 J_i)로 표현이 가능하고 또한 그 길이에 관계없이 그 영역은 각 Θ_q와 Θ_t로 대부분 나타낼 수 있다.

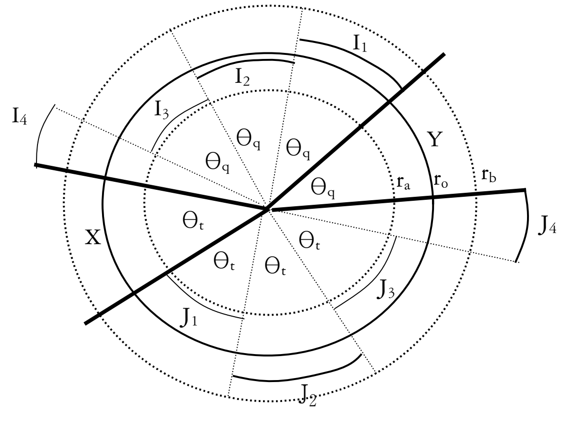

그림 4. YT의 최적 운행시간 간격의 예

TC에서 QC로 이동하는 영역에서 YT를 증가시킬 때 QC에 유휴시간 발생하지 않도록 하는 최초의 YT의 대수를 k_1이라 하자. QC에서 TC로 이동하는 영역에서 YT를 증가시킬 때 TC에 유휴시간이 발생하지 않도록 하는 최초의 YT의 대수를 k_2라 하자.

그러면 k_1과 k_2은 다음의 두 조건을 만족하게 된다.

$$k_1 = f_s(\frac{\theta_{tq}}{\theta_q}) + 1 \quad (12)$$

$$k_2 = f_s(\frac{\theta_{qt}}{\theta_t}) + 1 \quad (13)$$

단, $b = f_s(a)$에서 b는 a보다 같거나 큰 첫 정수

$$k = k_1 + k_2 \quad (14)$$

k 값 이상으로 YT를 더 투입하는 것은 YT의 대기만을 발생시킬 뿐 TC나 QC의 생산성을 증가시킬 수 없다. 따라서 TC와 QC의 컨테이너 취급시간의 변동을 YT의 운행시간 간격의 조정을 통해 모두 흡수할 수 있다면 k는 YT의 최적 대수가 된다.

극단적으로 TC와 QC의 컨테이너 취급시간들이 연이어 어느 이하의 값에서 발생한다면 YT의 속도의 제약 때문에 각각의 YT의 운행시간 간격을 TC와 QC의 컨테이너 취급시간들에 맞출 수 없을 것이다.

YT 최적 운행시간 간격은 TC에서 QC로 이동할 경우와 QC에서 TC로 이동할 경우에 대해서 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_j = Y_j \quad (15)$$

$$J_i = X_i \quad (16)$$

QC나 TC의 컨테이너 취급시간이 변동할 경우 개별 YT의 최적 속도는 각 YT가 속한 구간의 개별 운행시간 간격을 만족시키는 YT의 속도가 된다.

개별 YT의 최적 속도를 실제로 운영상에서 유지한다는 것은 어렵다. 그러나 <그림 4>와 <그림 5>와 같이 운행시간원에서 각도에 따른 구간 영역에서 YT의 운행시간 간격이나 YT의 속도를 관리하면 효율적일 것이다.

3.1 수치 예제

본 예제의 입력 데이터는 다음과 같이 가정한다.

$d_{tq} = 600m$

$d_{qt} = 900m$

$v_m = 300m / min$

$S_T \sim U(2.0, 2.8)$

$S_Q \sim U(1.5, 2.5)$

$T_{tq} = 600 / 300 = 2min$

$T_{qt} = 900 / 300 = 3min$

식 (6)의 평균적인 원의 반지름 r_0은 다음과 같이 정의된다.

$$r_0 = \frac{2.4+2+2+3}{2 \times 3.14} = 1.5$$

$\Theta_t, \Theta_q, \Theta_{tq}, \Theta_{qt}$는 각각 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\theta_t = \frac{2.4}{1.5} = 1.6(= 92.9^\circ)$$

$$\theta_q = \frac{2}{1.5} = 1.3(= 75.5^\circ)$$

$$\theta_{tq} = \frac{2}{1.5} = 1.3(= 75.5^\circ)$$

$$\theta_{qt} = \frac{3}{1.5} = 2(= 116.1^\circ)$$

그러면 k_1과 k_2, 그리고 k는 다음과 같이 된다.

$$k_1 = f_s(\frac{\theta_{tq}}{\theta_q}) + 1 = f_s(\frac{1.3}{1.3}) + 1 = 1 + 1 = 2$$

$$k_2 = f_s(\frac{\theta_{qt}}{\theta_t}) + 1 = f_s(\frac{2}{1.6}) + 1 = 2 + 1 = 3$$

$$k = k_1 + k_2 = 2 + 3 = 5$$

<그림 5>는 예제문제에서 결정된 5대의 YT를 사용할 경우 YT 운행에 대한 평균적인 그림을 제시하고 있다.

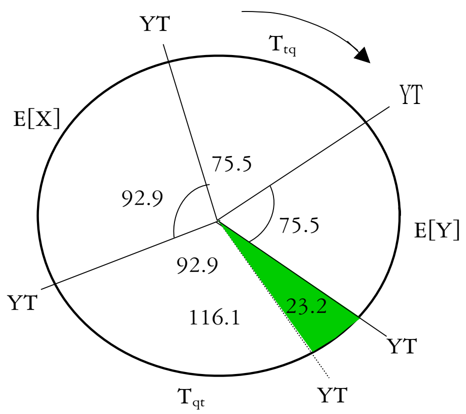

그림 5. YT의 운행에 대한 평균적인 그림

4. 결 론

본 논문에서는 QC와 TC간을 운행하는 YT의 최적 대수를 결정하는 해석 모형을 다루었다. 기존의 연구들은 야드 트랙터의 최적 대수를 결정하기 위해 주로 추계적 접근법이나 시뮬레이션을 이용하였으나 본 논문에서는 간단한 해석 모형을 통하여 QC와 TC의 컨테이너 취급시간이 일정한 경우와 변동하는 경우에 대해서 YT의 최적 대수와 최적 운행을 결정하는 방법을 제시하였다.

본 논문의 내용은 컨테이너 터미널에서 응용할 수 있으리라 생각되며 셔틀운송과 재공 운반 등 기타 분야로의 확장이 가능할 것이라 판단된다.

참고문헌

[1] 김갑환, 왕기홍 (1997), 추계적 접근을 통한 양적하 작업의 처리능력 예측, 한국경영과학회/대한산업공학회 97춘계공동학술대회, 60-63.
[2] 김경환, 김종석 역 (2005), 맨큐의 경제학, 445-467.
[3] 최용석, 김우선, 하태영 (2004), 컨테이너터미널의 야드 트랙터 소요 대수 추정, 한국항해항만학회지, **28**(6), 549-555.
[4] 하태영, 최용석 (2005), 자동화 컨테이너 터미널의 Shuttle Carrier 이송 능력 분석, 한국시뮬레이션학회논문지, 14(3), 109-118.
[5] 하태영, 최용석, 김우선 (2004), 시뮬레이션을 이용한 자동화 컨테이너 터미널의 AGV 운영평가, 한국항해항만학회지, **28**(10), 891-897.
[6] Cetinkaya, F. C. (2006), Unit Sized Transfer Batch Scheduling in an Automated Two-Machine Flow-Line Cell with One Transport Agent, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **29**, 178-183.
[7] Lai, K. K. and Lam, K. (1994), A Study of Container Yard Equipment Allocation Strategy in Hong Kong, *International Journal of Modeling and Simulation*, 14(3), 134-138.

김 기 영
부산대학교 산업공학과에서 학사, 석사, 박사
현재: 동서대학교 국제관계학부 물류유통학 전공 부교수
관심분야: 물류시스템