

## 대기이론과 시뮬레이션의 상호보완을 통한 컨테이너 터미널의 선박처리 시스템 분석

박명섭

고려대학교 경영학과 교수  
(mspark@kuccnx.korea.ac.kr)

박병인

고려대학교 경영학과 박사과정  
(bipark@suji.kmi.re.kr)

박광태

고려대학교 경영학과 교수  
(ktpark@kuccnx.korea.ac.kr)

본 논문은 대기이론과 시뮬레이션을 상호보완적으로 이용하여 혼잡 컨테이너 터미널의 선박 처리 시스템을 분석하였다. 특히 1989년의 실적 데이터를 사용해 BCTOC는 선박도착간 분포로 지수분포, 그리고 서비스시간 분포로 서로 다른 알량분포를 갖는 이질적 복수서버(heterogeneous multiserver with erlang service time)시스템임을 밝혔다. 즉, 선석52는 알량-6, 그리고 선석 53, 61 및 62은 알량-5 분포임을 밝혔다.

이러한 분포의 추정을 통해 대기행렬모형을 구성하였지만, 형태모수가 큰 복잡한 모형( $M/E_k^x/4$ )이기 때문에 해석학적인 분석이 어려워 시뮬레이션으로 필요한 성과측정치(performance measures)를 구하였다. 시뮬레이션 결과에 따르면 평균대기시간이 9.83시간, 평균 접안시간이 17.13시간, 선석점유율은 84.125%, 그리고 입항선박수가 1,720척으로 실제데이터로부터 구한 값과 유사했다. 다만 대기시간이 1.2시간정도 차이를 보였으나, 이는 선사들이 BCTOC의 체선으로 인해 스스로 스케줄을 조정한 때문으로 분석되었다.

한편 1989년 당시는 입항후 1시간이내 서비스가 시작되는 선박이 전체의 36.9%에 불과하고, 만 하루(24시간)이상 대기하는 선박도 12.9%나 되는 등 시스템의 전체서비스 수준이 매우 낙후된 것으로 분석되어 시급한 시설의 확충이 요청되는 상황이었다.

### I. 서 론

#### 1. 연구의 배경 및 목적

우리 나라 컨테이너 화물 전용터미널의 역사는 1978년 부산항 제5부두에 현재의 부산항 자성대부두(BCTOC : Busan Container Terminal Operation Corporation)가 개장되면서 시작되었으며, 컨테이너 전용터미널의 등장으로 일반화물선

에 비해 고가화물을 주로 운송하는 컨테이너 화물 처리 방식에 일대 전기를 맞게 되었다. 하지만 국내 컨테이너 터미널은 1991년 6월에 부산항 신선대부두(PECT : Pusan East Container Terminal)의 3개선석이 개장·운영될 때까지의 오랜 기간동안 자성대부두와 일반재래부두만이 존재하던 컨테이너 터미널 개발의 제1세대를 이루었다.

그러나 같은 시기에 선진 외국의 경우는 컨테이너 터미널의 운영에 있어 중앙정부나 지방정부와는 관계없이 지방항만청(Port Authority)에 의해 항

만에 대한 개발·투자관리가 독립적으로 이루어져 왔다. 뿐만 아니라 이와 동시에 각 지방항만들 간에도 경쟁관계에 있기 때문에 단순한 터미널 운영상의 체선률 절감이라는 소극적 동기에서의 터미널 개발·운영이 아니라, 서비스 수준을 제고함으로써 얻는 고객만족을 통한 수요증대를 위한 적극적인 마케팅사고에 따른 터미널의 개발·운영이 이루어지고 있는 실정이다.

따라서 개발방식이나 재원조달 등의 여러 가지 문제로 아직 발전단계에 있는 우리나라 컨테이너 터미널의 서비스 수준을 수리적인 방법을 이용해 평가해 보는 것이 추후 개발을 위한 지침이 될 수 있을 것이다. 물론 건설 완료후 서비스 개시를 준비중인 광양항 1단계의 1개선석을 비롯한 광양항 2단계, 부산항 4단계, 및 부산 가덕신항 등 많은 컨테이너 터미널이 계획 및 추진 중에 있어, 이러한 계획 및 추진중인 컨테이너 터미널이 완료되는 시점에는 체선 등이 상당히 줄어들게 되어 서비스 수준이 좀 더 향상될 것으로 기대할 수 있다.

그러나 추가적인 시스템의 확충 외에 혼잡이 가장 심했던 시스템에 대한 정확한 진단을 통한 시스템의 효율성 제고도 큰 의의가 있을 것이라 판단된다. 따라서 본 연구에서는 현재의 실제 컨테이너 터미널 화물 처리시스템을 정확히 분석한 후 대기행렬모형으로 체계화하고, 이를 시뮬레이션 결과와 비교하여 터미널의 운영상태를 분석해 보려는데 연구의 목적이 있다.

## 2. 연구의 방법 및 범위

본 연구에서의 이와같은 목적을 달성하기 위해서는 사실 BCTOC와 PECT를 포함한 국내 전체 컨테이너 터미널의 수년에 걸친 관련자료를 분석해야

할 것이나, 자료 입수의 곤란함과 크게 혼잡했던 시스템의 정확한 분석을 통한 효율성 개선이 큰 의의가 있다는 점에서 특히 체선이 심했던 1989년 BCTOC의 경우만을 분석하였다. BCTOC는 1978년 9월에 5만DWT급 2선석(52번, 53번 선석)을 개장하면서 우리나라 최초의 컨테이너 전용터미널이 되었으며, 이후 1983년 3월에 추가로 5만DWT급 2선석(61번, 62번선석), 이후 1996년 9월에 1만DWT급 1선석(65번선석)을 개장하였다.

여기서는 단지 1년간의 자료를 분석하였지만 우리나라처럼 항만시설이 절대 부족한 경우 선박이 폭주하는 것은 시간이나 터미널에 따른 특성이 크게 좌우되지 않을 것으로 여겨지기 때문에, BCTOC 자료가 우리나라 전체 컨테이너터미널의 안벽 선박처리시스템을 대표한다고 해도 무방할 것으로 판단된다. 다만 문제는 컨테이너 터미널의 시스템은 선박과 터미널간에 이루어지는 시스템만 존재하는 것이 아니라, 터미널의 배후지와의 관계, 터미널의 외항박 바다의 상태까지를 포괄하는 막대한 종합 시스템을 통합 분석해야만 한다. 그러나 이는 문제의 크기가 너무나 방대하기 때문에 본 논문에서는 터미널과 컨테이너선간에 이루어지는 안벽에서의 선박처리 시스템만을 그 대상으로 한정하여 분석하기로 한다.

## II. 문헌 연구

Bux와 Herzog(1977)은 대기행렬모형 등에서 분포함수가 가상적인 여러 단계(phases)로 이루어진 모델을 추정하는데 유용한 Coxian분포의 적용 방법에 대해 설명하고 있고, Grassman과 Zhao

(1996)는 이질적인 서버와 일반형태의 투입분포를 갖는 대기행렬시스템을 분석하고 시스템에 대한 안정상태 확률을 얻는 방법을 제시하였다.

또한 Mettam과 Cons(1967)는 항만의 계획과 설계에 있어 대기행렬의 해석학적인 분석을 적용하는 문제에 대한 연구를 수행하였다. 이 논문에서는 항만의 계획과 설계에 있어 선박이 선석에 접안 대기할 가능성을 실제로 추정하기 위해 대기행렬이론이 어떻게 적용될 수 있는가를 제시하고 있다.

Gleave(1981)는 대기행렬모형과 수송의 기종점, 육상과 해상에서의 단위 수송비용 및 항만비용 등의 자료를 이용해 각 항만에서의 수송량과 총시스템비용을 추정하는 연구를 수행하였고, Sen(1980)은 대기행렬 시스템에서 최적 서비스 수준 달성을 위한 서비스의 우선권문제에 대해 포아송 도착과 서비스(M/M/1)를 갖는 단일서버 시스템을 대상으로 분석하였다.

Wanhill(1974)은 대기행렬을 통해 선석건설비용과 선박시간비용의 최소화모형에 따른 최적항만개발 규모를 추정하는 연구를 수행하였으며, Katayama(1992)는 단일서버 다계층 서비스 대기행렬 시스템(single-server multi-class service queueing system:  $M^x/G/1$  type queue)에서의 평균대기 시간에 대한 공식을 구하고 있다.

Yamashita(1994)는 공동 버퍼를 갖는 이산시간 계층화 복수서버 대기행렬(discrete-time, classified multi-server queue)을 연구하였는데, 여기서 서버는  $m$ 개 있고, 각 서버는  $k$ 개의 계층 중 하나에 속하며( $m \geq k$ ),  $k$ 종의 작업이 시스템에서 서비스될 수 있다. 이 모델을 공동버퍼를 갖는 ATM(Automatic Teller Machine)에 적용하여 성과 측정치를 구하고 있다.

Mahendran(1981)은 컨테이너 터미널의 화물

처리 능력을 추정하기 위해 대기행렬모형을 통한 G-Gert시뮬레이션을 수행하였다. 여기서는 컨테이너 터미널이 항만작업을 끝낸 선박들로부터 항만의 배후지까지의 컨테이너 흐름으로 구성되는 직렬대기행렬 시스템의 네트워크라고 보았다. 또한 항만의 화물처리능력, 선박의 항차시간(round-trip time) 및 컨테이너의 장치기간(dwell time)에 입각한 각 장치장에서의 컨테이너 처리량, 도착 및 서비스 패턴, 장비고장시간 등과 같은 변수들의 변화 효과를 설명하고 있다. 또한 대기행렬시스템의 구조를 갖는 Q-Gert 시뮬레이션을 통해 현재 및 장래에 항만들이 직면하는 다양한 문제들을 반영하여, 취약부분을 식별하고 정확한 성과척도들을 계산하고 있다.

Agerschou과 Korsgaard(1969)는 항만계획과 관련된 많은 연구들을 소개하고 있다. 이 논문에서는 1966년 1년 동안에 부산항과 인천항에 대한 선박의 도착분포가 포아송 분포와는 크게 다르고 정규분포에 더욱 잘 근사화 된다는 분석결과를 제시했다. 또한 사이프러스 주요항만에서의 도착 분포는 포아송분포라는 사실을 발견했다.

반면에 서비스시간분포는 처리되는 화물의 유형, 이용가능한 화물처리 시설, 화물처리의 전후 문서처리과정에 필요한 시간과 같은 통관문제, 계획된 항로의 선박에 의한 선석의 장기 점유율, 그리고 화물을 기다리는 선박의 점유율 등의 영향을 받는다는 사실을 밝혔다. 브라질 아마존지역의 Manuas항에서는 외항화물선에 대한 서비스시간 분포만이 지수분포인 것으로 추정하였다. 또한 우리나라의 부산항 및 인천항의 경우 1966년의 실제 서비스시간 분포는 지수분포가 아니라는 사실을 발견했다.

한편 Korsgaard는 1~9선석을 갖는 건화물 처리부두에 대한 시뮬레이션 프로그램을 개발했으며,

Hansen은 보관시설을 포함하지 않는 일반부두의 시뮬레이션모델을 개발했는데, 여기서는 평균크기의 선석의 수 대신에 안벽의 길이를 모수로 사용했다.

Frankel(1987)은 항만과 관련된 다양한 대기행렬모형의 사용방법에 대해 전반적으로 소개하고 있으며, 동시에 항만관련 시뮬레이션 모델에 대해서도 소개하고 있다. 여기서 소개된 항만관련 시뮬레이션 모델은 일반적인 항만운영 통제관리 모델인 MIT Port Simulation, 항만 프로젝트 평가 도구로서 세계은행에서 개발한 PORTSIM, 항만작업의 평가와 작업규칙상의 항만확장이나 변화의 효과를 추정하기 위해 UNCTAD가 만든 POSIM, 그리고 Harvard와 Brookings에서 수행된 Colombia Transport Study의 결과 개발된 시뮬레이션 모델을 소개하고 있다.

한편 국내에서는 김창곤, 장학봉 및 운동한(1994)이 포항제철 전용부두에 대한 대기행렬시스템을 해석학적으로 분석하고 있으며, 박광태, 박병인 및 박명섭(1997)은 동부산 컨테이너 터미널(PECT)의 대기행렬시스템을  $M/E_2/3$  모델로 근사화하여 분석하고 있다.

### III. 선박 입출항분포 추정

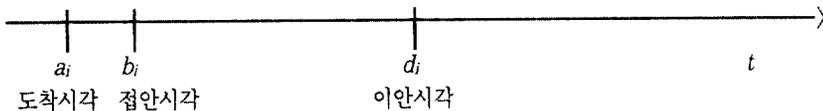
본 장에서는 BCTOC의 1989년도 선박입항 및 서비스자료를 분석한다. 즉, 1989년 BCTOC의 입

출항 선박들의 연간 도착 시간간격 분포 및 서비스 시간의 통계적 분포형태 등을 분석한다. BCTOC의 각종통계를 분석함에 있어서 실제로 관측된 값들과 가정한 확률분포간의 적합도(goodness-of-fit)를 검증하는 방법은 Page(1973)가 제시한 형태모수 추정방법을 기초로 수행하였다. 먼저 Page의 지침에 따라 가장 근접한 분포형태를 찾고 이것의 적합도를  $\chi^2$ 분포검정방법을 통해 확인하였다.

#### 1. 입항 및 서비스패턴 분석을 위한 기초

일반적으로 항만에 입항하는 선박과 관련된 시간의 흐름은 다음 <그림 1>과 같이 도시할 수 있다. 예를 들어, 임의의 선박이 부두에 도착하는 시각을  $a_i$ (arrival time of ship  $i$ ), 접안하는 시각을  $b_i$ (berthing time of ship  $i$ ), 그리고 이안(출항)하는 시각을  $d_i$ (departure time of ship  $i$ )라 하면, 선박  $i$ 의 (접안)대기시간은  $b_i - a_i$ , 재항시간은  $d_i - a_i$ , 서비스 시간은  $d_i - b_i$ , 및 도착간 시간은  $a_{i+1} - a_i$ 라 할 수 있다.

이와같은 선박의 입항패턴과 서비스패턴의 분석 결과를 대기행렬모형과 시뮬레이션 모형의 기초로 삼을 수 있다. 여러 논문이나 문헌을 참조할 때, 항만에서의 선박도착간 시간패턴과 서비스시간패턴은 지수분포나 일량분포를 따르는 것으로 알려져 있다(Agerschou & Korsgaard, 1969; UNCTAD, 1985). 일량분포에서 형태모수가 1인 경우가 지수분포이고, 감마분포에서 형태모수가 정수인 특수형



<그림 1> 항만내 선박  $i$ 의 도착 및 서비스시간

태가 일랑분포이므로 항만에서 선박의 입항패턴 및 서비스패턴과 관련된 분포는 감마분포라고 할 수 있다.

감마분포의 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f(x) = a^k x^{k-1} \frac{e^{-ax}}{(k-1)!}$$

여기서  $a$ : 단위시간당 평균 도착 횟수

$x$ : 시간

$k$ : 형태모수(phase parameter)

그리고 감마분포의 평균과 분산은 다음과 같다.

$$E(x) = \frac{k}{a}, \quad Var(x) = \frac{k}{a^2}$$

여기서  $a$ , 평균 및 표준편차와의 관계를 통해 형태모수  $k$ 를 구할 수 있다.

$$a = \frac{E(x)}{Var(x)}, \quad k = \frac{\{E(x)\}^2}{Var(x)} = a \cdot E(x)$$

대기모형에서 사용되는 일랑분포는 형태모수가 정수이어야만 하지만 대부분의 경우 위의 식을 이용해 구해지는 형태모수  $k$ 는 정수값을 보장하지 못한다. 따라서 실제 자료에서 도출된 형태모수가 정수값을 취하지 못하는 경우는 산출된 형태모수  $k$ 의 실수값에 가장 가까운 정수값을 취하여 실제 분포에 대한 예비분포로 삼아야만 한다(Page, 1973, p. 68).

## 2. BCTOC 입항선박의 도착패턴 분석

UNCTAD는 부두의 선박 도착형태가 일반적인 벌크화물을 취급하는 일반부두의 경우 지수분포

(exponential distribution), 전용부두(specialized berth)의 경우 일랑-2분포를 따른다고 제시하고 있다(UNCTAD, 1985, p.219).

본 절에서는 앞에서 제시한 Page의 근사적 형태모수 추정결과를 통해 판단해 볼 때 UNCTAD의 주장과는 달리 BCTOC가 전용 컨테이너 부두임에도 불구하고 선박 도착간 분포가 지수분포형태에 가장 가까운 것으로 나타났다.

$$a = \frac{E(x)}{Var(x)} = \frac{5.0577}{21.882} = 0.242211,$$

$$k = 1.2250$$

즉, 형태모수가 1과 가장 가깝기 때문에 지수분포로 예비추정할 수 있다. 실제로 1989년에 BCTOC에 입항한 전체 컨테이너선박 수는 1,730 척이었으며, 이 전체선박의 평균 도착시간 간격은 5.0577시간이고, 표준편차는 4.6778시간인 것으로 분석되었다.

우선 BCTOC의 도착시간간 분포가 Page방법에 따라 추정한 분포와 일치하는지를 검토해보기 위해 실제 선박도착 시간간격에 대한 데이터와 이 평균 및 표준편차에 대응하는 지수분포에서 기대되는 예상도착선박수에 따른 분포형태를 비교해 보았다. 일반적으로 많이 쓰이는  $\chi^2$ 검정을 통해 BCTOC의 실제 선박간 입항시간 자료와 지수분포에 대해 검정을 실시하면 <표 1>과 같은 결과를 얻을 수 있다. 즉, 선박의 도착시간간격 분포를 지수분포로 가정했을 때 우리가 분석하고자하는 BCTOC의 1989년 선박 도착간 분포의 카이제곱값은 35.64가 된다.

또한 <표 1>의 검정에서 계급수를 20개로 할 때 자유도는  $k-1 = 20-1=19$ 가 되고, 유의수준( $\alpha$ )을 0.01로 했을 경우 카이제곱분포표에 의해 임계

〈표 1〉 선박 도착시간간격의 카이제곱검정

계급구간	관찰도수( $O_i$ )	기대도수( $E_i$ )	$\frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$
0~0.2594	91	86.45	0.2395
~0.5329	84	86.45	0.0694
~0.8220	72	86.45	2.4153
~1.1286	97	86.45	1.2875
~1.4550	73	86.45	2.0926
~1.8040	75	86.45	1.5165
~2.1788	90	86.45	0.1458
~2.5836	79	86.45	0.6420
~3.0237	74	86.45	1.7930
~3.5057	76	86.45	1.2632
~4.0386	71	86.45	2.7612
~4.6343	101	86.45	2.4488
~5.3097	91	86.45	0.2395
~6.0894	92	86.45	0.3563
~7.0115	98	86.45	1.5431
~8.1401	98	86.45	1.5431
~9.5951	116	86.45	10.1007
~11.6458	94	86.45	0.6594
~15.1516	90	86.45	0.1458
15.1516~	67	86.45	4.3760
계	1729	1729	35.6385

주: 자유도:19, 유의수준:0.01, 임계값:36.2

값은  $\chi_{19,0.01}^2 = 36.2$ 가 된다. 따라서 도착간 분포가 지수분포라는 귀무가설을 기각하지 못함으로 BCTOC의 선박도착간 분포가 지수분포를 따르는 것으로 판단할 수 있다.

### 3. 접안시간 분포 분석

대기행렬이론을 이용하기 위한 두번째 모수 추정 단계로 대기행렬모형에서 서버의 서비스시간이라고

간주할 수 있는 접안시간의 분포형태를 추정해 보면 다음과 같다. 도착간분포와 마찬가지로 UNCTAD는 컨테이너 터미널을 포함한 전용터미널에서의 서비스분포가 얼랑-2를 따른다고 했으나 BCTOC의 경우 서버(선석) 4개 전체를 동시에 만족하는 하나의 유의한 분포를 추정할 수 없었다(UNCTAD, 1985, p.219). 따라서 52번, 53번, 61번 및 62번의 각선석별로 분포를 추정해 보았다.

우선 선석별로 적당한 통계분포를 추정하기 위해

〈표 2〉 BCTOC 각 선석의 서비스 시간 기술통계량

구분	52번선석	53번선석	61번선석	62번선석
평균	16.7212	17.3505	18.0844	16.4368
표준편차	6.7746	7.7777	8.0753	7.3229
최소값	3.5833	2.0000	4.3333	2.9167
최대값	52.2500	44.5500	49.4667	41.6667
관측수	430	430	424	446

〈표 3〉 BCTOC 각선석의 서비스 시간 형태 모수 추정

구분	52번선석	53번선석	61번선석	62번선석
$\alpha$	0.36	0.29	0.28	0.31
k	6.09	4.98	5.02	5.04
예비추정분포	얼랑-6	얼랑-5	얼랑-5	얼랑-5

각선석의 기술통계량을 분석하면 다음 〈표 2〉와 같다. 선석52는 평균 서비스시간이 16.72시간으로 연간 430척의 선박을 처리했으며, 선석53에서는 평균서비스 시간 17.35시간으로 선석52와 동일한 연간 430척의 선박을 처리했다. 또한 선석61에서는 평균서비스 시간 18.08시간으로 연간 424척의 선박을 처리했으며, 마지막으로 선석62는 선박당 평균 16.44시간에 연간 446척의 컨테이너선을 처리했다.

BCTOC가 1989년에 처리한 전체 1730척의 선박에 대한 서비스 시간분포를 Page방법에 따라 선석별로 예비 추정해 보면 〈표 3〉과 같다. 이를 각 선석별로 예비추정된 분포형태가 실제분포형태로 사용할 수 있는지를 카이제곱검정으로 검정해보면 다음 〈표 4〉와 같다. 즉, 각 선석에 대해 20개의 구간으로 나누어 카이제곱 검정을 할 때 유의수준 0.05에서의 임계값은  $\chi_{19,0.05}^2 = 30.1$ 이며, 선석 52는 카이제곱값 25.63, 선석 53은 28.23, 선석 61은 17.23 그리고 마지막으로 선석62는 26.74

의 값을 가져 전선석이 Page방법으로 예비 추정한 분포가 실제분포라고 판정할 수 있다.

#### IV. 대기행렬 모형설계 및 분석

기 설명한 BCTOC의 1989년 컨테이너선 처리 실적을 토대로 대기행렬 모형을 이용한 화물처리시스템을 분석한 결과는 다음과 같다. 아래의 각 항목에서 설명하는 바와 같이 도착률은 포아송분포(즉, 도착간 분포는 지수분포), 서비스율은 선석마다 다른 k값을 갖는 얼랑분포(heterogeneous multiservers with erlang service time), 그리고 서버(여기서는 선석)의 수가 4개인  $M/E_k^x/4$ 라는 대기행렬모형으로 분석할 수 있으며, 동 모형에 따라 제 모수를 계산해보면 다음과 같다.

〈표 4〉 서비스 시간분포의 카이제곱 검정 결과

선석	계급구간	관찰도수 ( $O_i$ )	이론도수 ( $E_i$ )	$\frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$	선석	계급구간	관찰도수 ( $O_i$ )	이론도수 ( $E_i$ )	$\frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$
52번	0~7.2769	25	21.5	0.5698	53번	0~6.8366	22	21.5	0.0116
	~8.7776	19	21.5	0.2907		~8.4413	20	21.5	0.1047
	~9.9055	23	21.5	0.1047		~9.6643	19	21.5	0.2907
	~10.8711	13	21.5	3.3605		~10.7209	23	21.5	0.1047
	~11.7499	21	21.5	0.0116		~11.6893	21	21.5	0.0116
	~12.5796	23	21.5	0.1047		~12.6089	18	21.5	0.5698
	~13.3834	14	21.5	2.6163		~13.5042	23	21.5	0.1047
	~14.1777	15	21.5	1.9651		~14.3930	29	21.5	2.6163
	~14.9760	19	21.5	0.2907		~15.2898	21	21.5	0.0116
	~15.7906	32	21.5	5.1279		~16.2084	26	21.5	0.9419
	~16.6344	25	21.5	0.5698		~17.1634	10	21.5	6.1512
	~17.5221	28	21.5	1.9651		~18.1715	27	21.5	1.4070
	~18.4721	25	21.5	0.5698		~19.2540	25	21.5	0.5698
	~19.5095	24	21.5	0.2907		~20.4401	17	21.5	0.9419
	~20.6712	20	21.5	0.1047		~21.7729	20	21.5	0.1047
	~22.0171	22	21.5	0.0116		~23.3224	35	21.5	8.4767
	~23.6564	28	21.5	1.9651		~25.2170	18	21.5	0.5698
	~25.8287	11	21.5	5.1279		~27.7385	13	21.5	3.3605
	~29.2774	24	21.5	0.2907		~31.7636	17	21.5	0.9419
	29.2774~	19	21.5	0.2907		31.7636~	26	21.5	0.9419
계	430	430	25.6279	계	430	430	28.2326		
61번	0~7.1258	19	21.2	0.2283	62번	0~6.4766	24	22.3	0.1296
	~8.7984	20	21.2	0.0679		~7.9968	18	22.3	0.8291
	~10.0731	25	21.2	0.6811		~9.1554	25	22.3	0.3269
	~11.1745	24	21.2	0.3698		~10.1564	13	22.3	3.8785
	~12.1838	19	21.2	0.2283		~11.0738	20	22.3	0.2372
	~13.1423	25	21.2	0.6811		~11.9450	26	22.3	0.6139
	~14.0755	19	21.2	0.2283		~12.7932	20	22.3	0.2372
	~15.0018	23	21.2	0.1528		~13.6351	20	22.3	0.2372
	~15.9366	23	21.2	0.1528		~14.4847	26	22.3	0.6139
	~16.8941	22	21.2	0.0302		~15.3550	36	22.3	8.4166
	~17.8895	16	21.2	1.2755		~16.2596	29	22.3	2.0130
	~18.9402	26	21.2	1.0868		~17.2146	14	22.3	3.0892
	~20.0685	17	21.2	0.8321		~18.2402	27	22.3	0.9906
	~21.3048	15	21.2	1.8132		~19.3638	25	22.3	0.3269
	~22.6939	23	21.2	0.1528		~20.6264	18	22.3	0.8291
	~24.3090	31	21.2	4.5302		~22.0943	18	22.3	0.8291
	~26.2838	13	21.2	3.1717		~23.8892	27	22.3	0.9906
	~28.9119	17	21.2	0.8321		~26.2778	16	22.3	1.7798
	~33.1072	22	21.2	0.0302		~30.0910	20	22.3	0.2372
	33.1072~	25	21.2	0.6811		30.0910~	24	22.3	0.1296
계	424	424	17.2264	계	446	446	26.7354		

주: 자유도:19, 유의수준:0.05, 임계값:30.1

1. 선석당 평균 도착률( $\lambda$ )

앞에서 살펴본 바와 같이 선박은 포아송 패턴에 따라 도착하는 것으로 가정할 때, 1989년 1년간 입항한 1,730척의 도착선박에 대해 계산한 평균 선박도착률은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \text{연평균 선박도착간 시간} &= \frac{24 \times 365}{1730} \\ &= 5.0636(\text{시간}) = \frac{1}{\lambda} \\ \lambda &= 1/5.0636 = 0.1975 \end{aligned}$$

2. 평균 서비스율( $\mu$ )

본 연구에서 서비스시간(즉, 접안시간)의 분포는 앞서 분석한 대로 선석마다 k값이 다른(heterogeneous) 일량분포를 따르는 것으로 추정되었다. 따라서 1989년 BCTOC의 실제 선박당 평균 서비스 시간은 전체 선박의 서비스 시간에 대한 관찰치로부터 17.14시간으로 계산되었으나, 선석당 평균 서비스율을 기초로 한 전체 시스템의 평균 서비스율은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_{52} + \mu_{53} + \mu_{61} + \mu_{62} = \frac{1}{16.7212} \\ &+ \frac{1}{17.3505} + \frac{1}{18.0844} + \frac{1}{16.4368} = 0.2336 \end{aligned}$$

3. 선석 점유율( $\rho$ )

선석 점유율은 선석의 평균 이용률을 의미하는 것으로 다음과 같이 선박의 도착률과 서비스율의 비율로부터 84.5%로 계산된다.

$$\rho = \lambda / \mu = 0.1975 / 0.2336 = 0.845$$

4. 선박의 평균 대기시간( $W$ )

선박이 서비스를 마치고 떠나기까지 소요되는 시간은 평균 서비스 시간과 대기시간으로 부터 계산된다. 여기에서 평균 서비스 시간은 앞의 2절에서 구해졌으나, 대기행렬모형을 통한 선박대기시간의 추정은 서비스시스템이 일량-5 또는 일량-6분포를 따르는 복잡한 형태이기 때문에, 해석학적인 분석이 어려워 시뮬레이션을 이용해 추정하였다. 따라서 대기시간은 다음장의 시뮬레이션 부분에서 구하기로 한다.

## V. 시뮬레이션 모형 설계 및 분석

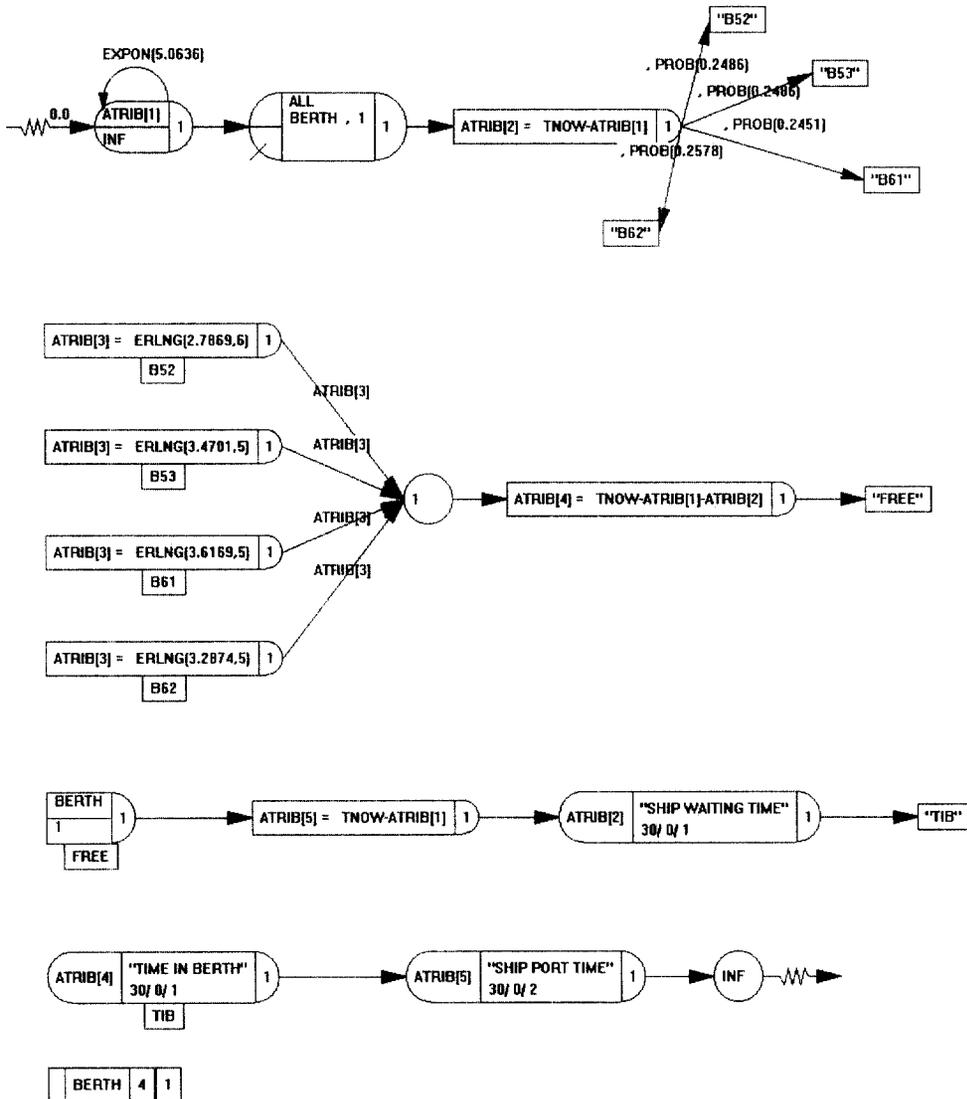
1. 시뮬레이션 수행시간

BCTOC선박입출항 시스템 분석모델 시간흐름의 기본단위는 시간(hour)으로 하였다. 따라서 모델 내의 모든 시간에 관련된 수치의 단위는 시간이다. 일반적으로 대부분의 통계자료가 연간처리량을 의미하며 시뮬레이션 수행 초기에는 모든 데이터가 0(zero)으로 되어 있으므로 데이터 생성이 정상상태에 달하도록 우선 2,400시간(100일)동안 시뮬레이션을 수행한 다음 다시 축적자료를 0으로 설정하고 그 후로부터 8,760시간(365일)간의 자료를 모았다. 따라서 전체적으로 시뮬레이션을 11,160시간동안 수행했다. 또한 1회 수행에 의한 표본오차를 줄이기 위해 이와 같은 11,160시간씩의 시뮬레이션을 10회 수행하였다.

## 2. 네트워크 분석

BCTOC 선박입출항 시스템 분석 시뮬레이션 모델인 AweSim Network Model이 <그림 2>에 나타나 있다.

여기서는 앞의 가정에 의해 선박의 평균도착시간 간격이  $5.0636 (= 365 \times 24 / 1730)$ 인 지수분포를 따라 생성된다. 이렇게 생성된 선박은 그 도착시간을 ATRIB(1)에 기억시키는데, 이것은 개체가 생성되어 소멸될 때까지 그 개체의 여러 특성을 기록



<그림 2> 시뮬레이션 네트워크 모델

하는 장소들이다. 본 모델에서 선박은 3개의 속성 값을 갖는데 그 것은 도착시각, 선석대기시간, 체항시간이다.

또한 Resource노드에서 선석은 미리 4개로 지정되어 있다. 도착선박은 선석에 접안한다. AWAIT노드는 Resource노드에서 지정된 선석을 기다리는 개체를 보관하는데 사용되는데, AWAIT노드에서 여유선석이 없으면 선박은 File 1에서 선석을 기다린다. 기다리다가 선석에 여유가 생기는 대로 선석을 차지하고 File 1에서의 대기시간을 ATRIB(2)에 기록한다. 이 대기시간은 File 1을 빠져 나오는 시각과 앞서 발생된 시각[ATRIB(1)에 기록된 시각]과의 차이이다. 다음 현재 관찰된 선석당 선박처리비율에 따라 각 선석별로 입항선박이 할당된다. 즉, 선석52에 24.86%, 53에 24.86%, 61에 24.51%, 그리고 62에 25.78%가 할당된다. 여기서 각선석은 열랑-6(선석 52) 또는 열랑-5(선석 53,61,62)분포에 따라 선박을 처리 [ATRIB(3)]한 후 선박당 서비스 시간을 ATRIB(4)에 기록한다. 마지막으로 선박입항시간부터 출항시간까지의 경과시간인 체항시간을 ATRIB(5)에 기록한다.

다음에 모델은 선박이 개체에 대한 통계치를 수집하는 역할을 하는 COLCT 노드를 지날 때마다 다음

의 자료를 축적한다. 축적되는 자료는 선박당 선석대기시간(ATRIB(2)), 선박당 접안시간(ATRIB(4)) 및 체항시간(ATRIB(5))이다. 자료축적이 끝나면 이용선박의 대기시간 및 접안시간을 구한다.

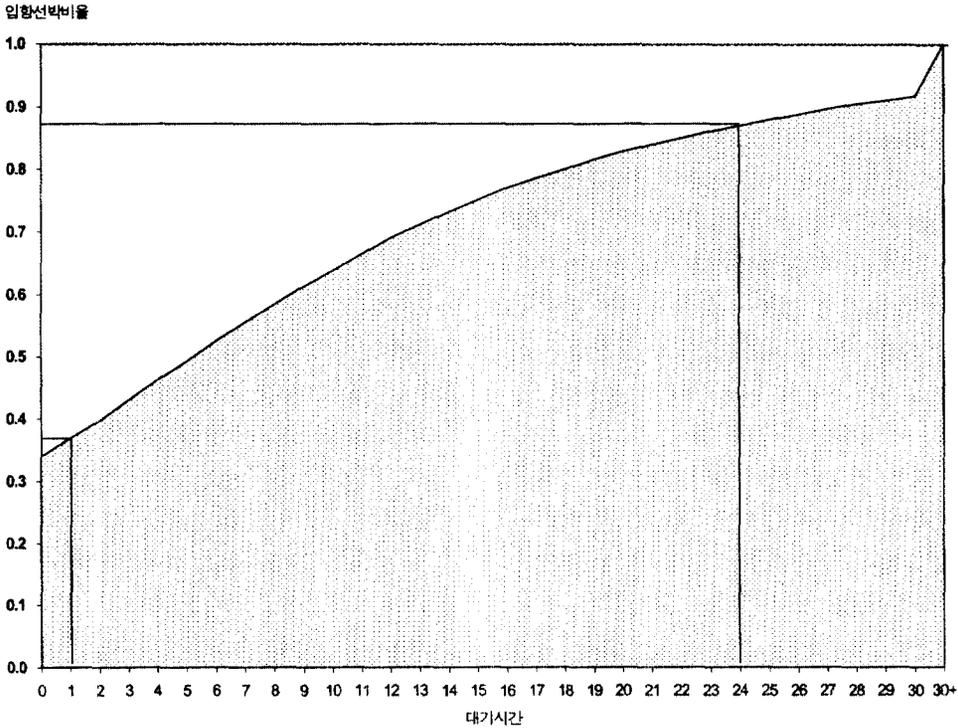
### 3. 결과 분석

부록은 시뮬레이션 수행결과를 첨부한 것으로, 선석대기시간, 접안시간, 및 체항시간 등이 나타나 있다. 이들의 값과 BCTOC의 1989년 실적치와 비교한 결과를 <표 5>에 요약하였다.

<표 5>에서 보는 바와 같이 시뮬레이션을 통해 구한 값이 BCTOC의 실적치와 유사하다. 그러나 가장 중요한 값인 평균 선석대기시간에서는 어느 정도 차이가 난다. 즉, BCTOC의 실적에 의한 1989년에는 전체 선박의 평균 대기시간이 8.68시간으로 조사되었으나, 시뮬레이션에 의해 계산한 평균 대기시간은 9.83시간으로 추정되어 약 1.2시간의 차이를 보이고 있다. 이는 선사들이 BCTOC의 선석부족을 고려하여 스스로 스케줄을 조정했기 때문에 실제 선석대기시간이 감소한 것으로 해석할 수 있다. 왜냐하면 선박의 속력과 연료소모량간의 관계는 3제곱에 가까운 관계를 갖기 때문에(임석

<표 5> 선박 입출항 모델 수행결과 비교

구 분	BCTOC실적	대기행렬모형	시뮬레이션 결과
선박당 평균대기시간	8.68	-	9.83
선박당 평균접안시간	17.12	17.14	17.13
선박당 평균체항시간	26.04	-	27.02
평균 도착률( $\lambda$ )	-	0.1975	-
평균서비스율( $\mu$ )	-	0.2336	-
선석 점유율	84.5%	84.5%	84.125%
입항선박수	1,730척		1,720척



〈그림 3〉 선박 대기시간 누적 분포

민, 1998, p.8) 접안 스케줄상 장시간 대기할 가능성이 있는 선박은 서행운항(slow-steaming)함으로써 연료사용량 절감에 의한 비용절약과 실제적인 대기시간도 줄일 수 있기 때문이다.

또한 10회에 걸친 시뮬레이션 결과를 종합해보면 전체입항선박의 36.9%가 1시간 이내의 대기시간을 통해 서비스를 받기 시작하며, 하루 24시간 이상을 대기하는 선박의 비율도 12.9%에 달할 정도로 선박체중이 극심했음을 〈그림 3〉을 통해 알 수 있다. 따라서 1989년 당시 BCTOC의 전체적인 서비스 수준은 상당히 열악하여 추가적인 터미널의 건설이 시급히 요청되는 상황이었던 것으로 판단할 수 있다.

## VI. 결론 및 추후연구과제

지금까지 대기이론과 시뮬레이션을 이용해 1989년 BCTOC의 컨테이너선 입출항시스템에 대한 분석을 수행하였다. 위 방법을 통한 시스템의 분석을 위해 관련분포를 추정한 결과 선박의 도착간 분포가 지수분포, 터미널의 서비스시간 분포가 선석별로 다른 형태를 갖는 열량분포(선석52는 열량-6, 나머지는 열량-5)를 따르는 것으로 검증되었다. 이를 기초로 대기행렬시스템의 성과측정치(performance measure)를 구하기 위해 대기행렬모델로 구성한 바, 평균도착률( $\lambda$ )은 0.1975이며, 평균 서비스율

( $\mu$ )은 0.2336, 선석점유율( $\rho$ )은 84.5%로 분석되었다.

그러나 대기행렬모형을 통한 선박대기시간의 추정은 서비스시스템이 얼랑-5 또는 얼랑-6분포를 따르는 복잡한 형태이기 때문에, 해석학적인 분석이 어려워 시뮬레이션을 이용해 추정하였다. 시뮬레이션 모델에 따르면 평균대기시간은 9.83시간이며, 평균접안(서비스)시간은 17.13시간이고, 선석점유율은 84.125%인 것으로 추정되었다.

또한 시뮬레이션 모델을 따를 때 전체 입항선박중 겨우 36.9%만이 1시간이내의 대기후 서비스를 받으며, 만 하루(24시간)이상을 대기하는 선박도 전체의 12.9%나 되는 등 1989년 BCTOC의 서비스수준이 극히 낮아서, 긴급한 터미널을 건설을 통한 서비스 수준의 제고가 요청되는 상황이었다는 것을 알 수 있다.

한편 본 논문에서는 시뮬레이션 모형의 구축시 입항선박에 확률적으로 선석을 배정하는 것이 아니라 전체 입항선박의 선석당 처리비율에 따라 선석을 배정하였는데, 추후에는 이 것도 더욱 합리적으로 고려해 주어야만 할 것이다. 또한 대기행렬 모형이나 시뮬레이션 모형으로부터 구한 대기시간에 대한 경제적 가치평가도 수행하면 훨씬 실용적인 연구가 될 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

김재련(1987), **컴퓨터 시뮬레이션**, 박영사.  
 김창곤·장학봉·윤동환(1994), "항만하역 대기시스템에 대한 해석학적 분석 -포항제철 전용부두를 중심으로-", **해양정책연구**, 제 11권, 제2호, 481-513.  
 박광태·박병인·박명섭(1997), "대기행렬모형을 이용한

동부산 컨테이너 터미널의 안벽 대기시간 분석," **로지스틱스연구**, 제7권, 제1호, 33-46.  
 이영해·백두권(1989), **시스템 시뮬레이션**, 경문사.  
 임석민(1998), **국제운송론**, 삼영사.  
 해운산업연구원(1991), **부산항 4단계 개발 실시실계: 기본계획 검토 및 기본설계**, 해운항만청.  
 Agerschou, H. & J. Korsgaard(1969), "Systems analysis for port planning," *The Dock & Harbor Authority*, 411-415.  
 Bux, W. & U. Herzog(1977), "The Phase Concept: Approximation of Measured Data and Performance Analysis," *Computer Performance*, Chandy, K.M. & M.Reiser(eds.), North Holland Publishing Company.  
 Frankel, E. G.(1987), *Port Planning and Delopment*, John Wiley & Sons.  
 Gleave, G. R.(1981), "A Port Traffic Allocation Model," *The Dock & Harbor Authority*, Vol. 61, No. 725, 274-376.  
 Grassman, W. K. & Y. Q. Zhao(1996), "Heterogeneous Multiserver Queues with General Input," *INFOR*, 35, 208-224.  
 Gross, D. & C. Harris(1985), *Fundamentals of Queueing Theory*, 2nd ed., John Wiley & Sons.  
 Katayama, T.(1992), "A Note on Conservation Laws for a Multi-class Service Queueing System with Setup Times," *Queueing Systems*, 11, 299-306.  
 Law, A.M. & W.D. Kelton(1991), *Simulation Modeling and Analysis*, 2nd ed., McGraw-Hill.  
 Mahendran, R.(1981), *Capacity Modelling of a Container Terminal*, Master Thesis, MIT.  
 Mettam, J.D. & M. Cons(1967), E., "Forecasting delays to ships in port," *The Dock and Harbour Authority*, 379-82.  
 Page, E.(1973), *Queueing Theory in OR*, Butterworths.  
 Prisker, A.A.B.(1986), *Introduction to Simulation and SLAM II*, 3rd ed., John Wiley & Sons.

- Prisker, A.A.B., J.J. O'Reilly, & D. K. LaVal(1997), *Simulation with Visual SLAM and AweSim*, John Wiley & Sons.
- Sen, P. (1980), "Optimal Priority Assignment in Queues: Application to Marine Congestion Problems," *Maritime Policy and Management*, Vol. 7, No.5, 175-184.
- UNCTAD(1985), *Port Development*, 2nd ed., United Nations.
- Viswanadham, N. & Y. Narahari (1992), *Performance Modeling of Automated Manufacturing Systems*, Prentice-Hall.
- Wanhill, S.R.C.(1974), "A Study in Port Planning : The Example of Mina Zayed," *Maritime Studies and Management*, 2, 48-55.
- Yamashita, H.(1994), "Discrete-time Analysis of a classified multiserver queue with burst arrivals and a shared buffer," *Queueing Systems*, 18, 167-182.

〈부 록〉

\*\* AweSim! MULTIPLE RUN SUMMARY REPORT \*\*

Simulation Project : BCTOC PERFORMANCE MEASURE

Number of runs 10

\*\* OBSERVED STATISTICS \*\*

Label	Mean Value	Standard Deviation	Coeff. of Variation	Minimum Average Value	Maximum Average Value	Number of Observations
WITING TIME	9.883	1.783	0.180	6.783	12.250	10
TIME IN BERTH	17.134	0.156	0.009	16.930	17.458	10
PORT TIME	27.017	1.840	0.068	23.828	29.321	10

\*\* FILE STATISTICS \*\*

File Number	Where Created	Average Length	Standard Deviation	Maximum Average Length	Average Wait Time
1	RESOURCE BERTH	1.941	0.340	2.460	9.862

\*\* RESOURCE STATISTICS \*\*

Resource Number	Resource Label	Average Util.	Standard Deviation	Average Available	Maximum Average Utilization	Minimum Average Utilization
1	BERTH	<u>3.365</u>	0.064	0.635	3.473	3.276

Maximum Average Available	Minimum Average Available
0.724	0.527

## An Analysis on the Ship Handling System at a Container Terminal using Queueing Theory and Simulation simultaneously

Myung Sub Park\* · Byung In Park\*\* · Kwangtae Park\*

### Abstract

This paper analyzes the quayside ship handling system of a container terminal using queueing theory and simulation simultaneously. In particular, we present that the ship's interarrival distribution of BCTOC(Busan Container Terminal Operation Corporation) is an exponential distribution. Meanwhile we say that the system is a heterogeneous multiserver with different erlang service times: berth #52 6-erlang, and berth #53, #61 & #62 5-erlang respectively.

Even though we build a queueing model through the process of estimation of statistical distribution, the model is too complicated to analyze because of having large shape parameters. Thus, we should get performance measures using simulation. Results of simulation (average waiting time 9.83 hours, average berthing time 17.13 hours, occupation rate 84.125%, and the number of arrival ships 1720) are similar to real data. However, waiting time is greater than real data by 1.2 hours, which is due to the fact that shipping companies themselves adjusted a traveling schedule because of BCTOC's congestion.

Only 36.9% of total arrival ships were begun to serve in less than an hour and 12.9% of ships waited for more than 24 hours. Therefore, the service level of the system was so poor that it needs the expansion of the container terminal.

---

\* Professor, Department of Business Administration, Korea University

\*\* Ph.D.Student, Department of Business Administration, Korea University.