

# 시나리오를 이용한 울산 내항의 혼잡 분석

하 창 승<sup>†</sup> · 백 인 흥  
(<sup>†</sup> 동명대학교 · 부산해사고등학교)

## Congestion Analysis in the Inner Harbour of Ulsan Using a Scenario

Chang-Seung HA<sup>†</sup>, Ih-Huhm BAEK

<sup>†</sup> TongMyong University, Pusan Maritime Highschool

(Received June 18, 2007 / Accepted August 6, 2007)

### Abstract

Since traffic congestion ratio at any given port fluctuates on the number of arriving and departing vessels, the total tonnage of freight volume being handled, and the number of berth in operation and other factors, there exists a need to numerically analyze the waterway traffic volume. However, there are no effective regulations in regards to the waterway traffic analysis prior to expansion of a port facility. The current analysis requires the traffic analysis in relation only to the width of the waterway, which clearly falls short of achieving a comprehensive evaluation study that could be used in consideration of port expansion.

This study provides five scenarios to execute a comprehensive evaluation study and base for the sensitivity study by analyzing the scenarios. As a result of the sensitivity analysis, the A, B, and C scenarios varies the average arrival ratio of the berth shows 1.1, 1.19, and 1.28 times of delays respectively. Also, The D and E scenarios take place malfunctions of pier shows 1.21 and 1.53 times of delays respectively. Therefore, various strategies of harbor development and method of harbor management are needed for the flexible correspondence to the environmental changes such as the excessive increasing of the freight volume and often taking place of malfunctioning.

*Key Words : congestion analysis, scenario, sensitivity, average arrival ratio, average service ratio*

### I. 서 론

최근 한·미 자유무역협정(FTA)의 타결로 자동차, 섬유, 기계 업종 등을 중심으로 한·미간의 무역량 증가가 예상되고 있으며, 중국의 WTO가입 이후 대중국 무역의 호조로 한·중간의 물동

량도 크게 증가되고 있다. 특히, 해상 물동량은 환적화물을 중심으로 급속히 증가하고 있는데, 이것은 2006년 10월부터 세계 최대 선사인 머스크가 부산항의 기항을 늘리면서 그 비중이 증대되고 있기 때문이다. 그리고 2007년 4월에는 MSC까지 아시아 환적 기지를 중국의 Ningbo항에서 부산

<sup>†</sup> Corresponding author : 019-509-3495, hacha@tu.ac.kr

항으로 옮기면서 환적화물의 증가세는 더욱 커지고 있다. 이에 따라 주요항만에서 외항선박의 입출항이 늘어나고 있으며 해상 교통량도 증가되고 있다.

우리나라 주요 항만에서의 선박 입출항의 빈도는 지난 2000년에는 부산항이 72,022척, 인천항이 44,944척, 울산항이 36,843척, 광양항이 16,981척을 기록했다. 그러나 2006년에는 부산항이 100,787척, 울산항이 52,080척, 광양항이 43,645척, 인천항이 41,905척을 기록하여 항만별로 입출항하는 선박의 척수가 크게 증가하였으며 항만간 입출항의 빈도 순위도 변화되었다(해양수산부 2007). 이와 같은 해상 교통량의 변화는 국가간 물동량의 증감에 따라 크게 영향을 받을 것으로 예상된다.

특히 울산항은 우리나라 산업의 전략적 거점항으로 배후에는 대규모 국가공업단지를 보유하고 있고 2005년 국내원유 수입의 56%, 자동차 수출의 38%, 선박수출의 38%가 울산항을 이용하였다. 또한 울산항에는 5만 톤급의 일반화물선이 계류하는 안벽과 35만 톤급의 원유선이 계류하는 원유부이(BUOY) 5기, 15만 톤급의 유조선이 계류하는 돌핀 1기를 비롯해 모두 96척의 선박이 동시에 접안할 수 있는 항만시설을 갖추고 있어 물동량 처리 능력이 높은 항만이다(울산지방해양수산청 2007).

그러나 울산항이 거점항으로서의 중요성에도 불구하고 전반적으로 하역시설이 부족하고, 하역장비가 낙후되어 있으며, 더욱이 인근 부두의 빈번한 보수공사는 선석 운영을 제한하여 체선율을 증가시키고 있다. 울산항의 체선율은 2005년 3분기 5.3%에서 2006년도에는 4.3%로 다소 감소하고 있지만 2005년 부산항의 체선율 2.1%에 비해 여전히 높은 편이다(울산지방해양수산청 2007).

이와 같이 항만의 혼잡도 지표인 체선율은 선박의 입출항 횟수, 항만시설 및 제한적인 선석운영 등에 따라 계속 변화하기 때문에 체선율을 개선하기 위해서는 항만기반 시설의 확충과 함께

해상 교통량에 대한 개량적인 분석과 연구가 필요하다. 하지만 우리나라의 경우 항만시설의 확충시 증가된 해상 교통량에 의한 혼잡도를 측정하는 의무화된 규정이 없어 혼잡도 평가와 관련된 연구가 부족한 편이다. 또한 기존의 혼잡도 평가 방법도 대부분 항로 폭에 대한 교통량을 평가하는 방법을 사용하고 있기 때문에 선박의 도착률과 부두의 서비스시간을 고려한 평가 방법은 찾아보기 어렵다.

따라서 이 연구는 울산 내항의 혼잡도를 분석하기 위해 입항하는 선박의 평균도착률, 선박의 평균서비스율, 선석 수를 고려한 대기행렬식과 시나리오를 구성하고 이 시나리오에 따라 선박의 대기시간을 계산한다. 이러한 혼잡도 분석을 통해 항만확충의 타당성과 항만관리의 효율성을 평가하는 근거를 제공하고자 한다.

## II. 이론적 연구

### 1. 항만의 혼잡 분석을 위한 관련 연구

항만의 혼잡 분석을 위한 기존 연구는 <표 1>과 같이 시뮬레이션을 이용한 실험적 방법과 대기행렬을 이용한 해석적 방법이 있다.

<표 1> 항만의 혼잡분석에 관한 선행연구

연구자	연구 초점	이 연구 초점
구자윤 외 1 (2000)	항로의 분기점에서 선박항행을 시뮬레이션	- 시나리오에 따른 단계별 혼잡대응 방안 고려
여기태 외 3 (1998)	항로 상황을 수치로 모형화 하여 시뮬레이션	
구자윤 외 1 (2001)	대기행렬을 이용한 버퍼링 모델	- 대기행렬을 이용한 혼잡 모형 설정
구자윤 (1997)	대기행렬과 시뮬레이션 결합 연구	- 안벽의 적정 능력 산정방법을 혼잡도에 응용
윤원영 외 2 (2001)	안벽과 야드를 복합대기 네트워크로 간주	
이영찬 외 2 (2006)	안벽의 대기행렬을 시뮬레이션	

먼저 시뮬레이션을 이용한 연구로는 구자윤, 여기태가 감만부두 확장이 부산 북항에 미치는 혼잡도 평가에서 북항 항로의 선석 위치별 평균 대기시간과 평균대기선박수의 평가를 위해 항로의 분기점에서 선박항행을 시뮬레이션 하였다. 이 연구에서는 선박의 항로 진입부 도착을 포아송(poisson) 분포로 보고 선박간의 이격거리는 선박 길이와 선속에 따른 최소이격 거리로 간주한다. 또한 항로의 진입순서는 FCFS(first come first served) 규칙을 따른다는 가정을 설정하였다(구자윤 외1 2000).

여기태, 이홍길, 석상문, 이철영은 부산항 해상 교통 혼잡도 평가에 관한 연구에서 각 지점에서의 대기시간을 구하기 위해 항로의 상황을 수치로 모형화 하여 시뮬레이션 하고 있다. 이 연구에서는 기존의 통계자료를 분석하여 통항선박의 규모, 물동량, 입항척수 등을 기준으로 2011년 선박 교통량을 추정하고 부산항 수로 모형을 시뮬레이션 모형으로 해석하고 있다. 혼잡도를 측정하는 기준으로는 항로 교차부에서의 평균대기시간 대기선박수, 대기할 확률을 이용하고 있다(여기태 외3 1998).

대기행렬을 이용한 연구는 구자윤, 여기태가 진입항로에 대한 해상교통 혼잡도 평가에 관한 연구에서 항로 및 좁은 수로에서는 병행통행이 가능하므로 이를 모델링 할 수 있는 기법으로 범퍼모형을 제안하고 있다. 범퍼모형은 환산 교통량을 기준으로 항로상에서 선박이 점유할 폐쇄영역의 규모를 산출한다. 이때 환산교통량에 사용하는 척도는 선박길이의 제곱인 L2를 사용한다. 이는 항해에 필요한 해수면이 선박길이의 제곱에 비례하므로 이를 통해 항로의 교통량을 평가하고 있다(구자윤 외1 2001).

대기행렬과 시뮬레이션을 결합한 연구는 구자윤이 울산 신항만의 혼잡도 평가를 위해 항계 내 항로의 해상교통량을 분석한 연구가 있다. 이 연구에서는 항로에서 단선항행 시 교통량에 의한 혼잡도 평가는 항로의 형태에 따라 직선부나 진

입부에 있어서는 대기행렬을 적용시키고, 교차부가 존재하여 항법의 적용이 필요하거나 야간통항 제한과 같은 특정의 입출항 규칙이 존재할 경우에는 각 제한 조건의 모델을 구성하여 혼잡도를 시뮬레이션 하였다(구자윤 1997).

한편, 항만의 교통량 및 혼잡도는 안벽에서의 화물 처리능력과 직접적으로 관련되어 있으므로 윤원영, 최용석, 송진영은 컨테이너 크레인의 하역능력 분석에 관한 연구에서 항만을 선박의 대기행렬과 야드 트랙터의 대기행렬이 서로 연결되어 있는 복합대기 네트워크로 보고 혼잡도를 평가하였다. 복합대기 네트워크는 빈 선석이 있는 경우 즉시 접안하고 빈 선석이 없는 경우 정박지에서 대기행렬을 형성한다. 선석을 점유한 후에는 터미널에서 서비스를 받은 후 출항하는 개방형 네트워크를 형성한다. 복합대기 네트워크에서는 선박의 대기가 안벽의 처리능력과 야드의 처리능력에 함께 영향을 받으며 항만의 운영능력을 평가하는 기준이 된다고 하였다(윤원영 외2 2001).

이영찬, 박남규, 서창갑은 컨테이너항만의 선박 접안 시뮬레이션 모델링을 위한 자료 분석 연구에서 항만을 선석 수에 따라 유형별로 세분화하고 선박의 도착시간간격, 선박별 양적하 작업량, 크레인 할당 수 등을 계산하고 이들의 분포를 추정하여 안벽에 대한 대기행렬 시뮬레이션을 수행하여 적정하역능력을 산정하고 있다(이영찬 외2 2006).

## 2. 항만의 혼잡 분석 방법

일반적으로 혼잡 분석은 실험을 위해 충분한 데이터가 준비되어 있는 경우 시뮬레이션 방법이 우수한 것으로 알려져 있지만 대상이 단순하거나 데이터가 제한된 경우에는 대기이론(queueing theory)이 효율적이다. 특히 선박이 진입하는 항로와 같이 병행금지 및 타 선박의 추월 금지 등의 규정이 있는 단선 구조에는 항로와 부두를 서버로 보고 선박을 이용자로 생각하는 대기이론을

활용하여 선박의 대기시간 변화량을 통해 항만의 혼잡을 분석하는 것이 더 효과적이다. 따라서 이 연구에서는 선박의 대기시간 변화량을 측정하기 위해 [그림 1]과 같이 항만을 실증분석하고 시나리오별로 대기행렬 식을 평가하여 혼잡도를 분석한다.

대기행렬식을 모델링할 때 대기행렬은 서비스를 제공하는 서버의 수가 서비스를 원하는 개체의 수보다 부족하거나 서버의 능력이 부족하기 때문에 발생한다. 그리고 서버의 처리 능력이 고객의 평균 도착률 보다 크다고 하더라도 도착시간의 불확실성으로 말미암아 혼잡이 발생할 수 있다. 따라서 평균 도착률 만으로 대기행렬을 분석 하게 되면 시스템에 대한 분석을 적절히 행할 수 없다. 이를 해결하기 위해 확률분석 방법을 적용해야 한다.

동안 도착하는 확률분포를 함수로 표현하면 식 (1)과 같다.

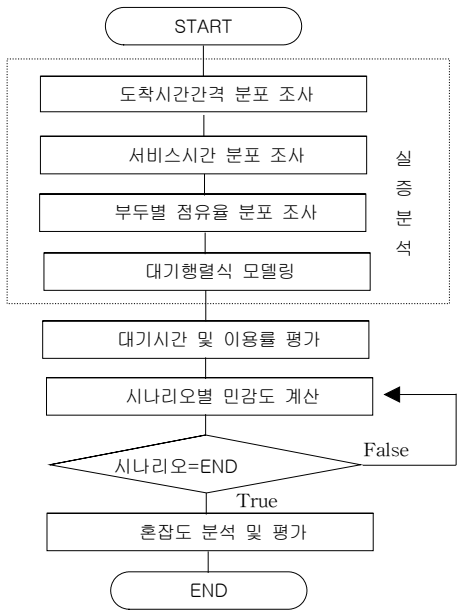
$$P_i(n) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} \cdot e^{-\lambda t} \dots \dots \dots (1)$$

대기행렬 모델의 기본 목표는 서비스를 제공하는데 필요한 처리비용과 서비스를 받으려는 개체가 대기할 때 발생하는 대기비용의 합을 최소화 하는 모델을 개발하는데 있다. 항만운송시스템의 서비스 제공자가 수요자보다 많으면 과도한 투자를 유발시키게 되며, 서비스 제공자가 수요자보다 적다면 대기행렬을 길게 만들어 대기비용이 과도하게 된다.

만약 서버의 유휴시간 비용을 정확히 알 수 있다면 개체의 도착률과 서버의 서비스율의 상태를 분석하는 확률분포 함수를 이용하여 대기시간, 최적 서버의 수, 서비스율 등을 결정할 수 있어 항만의 개발에 필요한 최적 선적의 수 및 장비의 대수 등을 결정할 수 있다(D. Gross and C. Harris 1985). 이 방법은 항만에서의 선박도착 형태와 선박의 하역 및 선적시간을 산정함으로써 평균 선적점유율과 선박의 대기시간 간의 관계를 규명하는데 사용된다.

특히 ESCAP에서 개발된 ESPOCA모델은 대기행렬이론에 근거해 예상되는 물동량 및 항만시설이 제시되어 있을 때 항만시설과 하역작업과의 관계를 평가하는데 적용 된다(ESCAP 1990).

항만에서 대기행렬 문제의 해석은 UNCTAD의 기본가정에 따라 선박의 도착률이 포아송 확률분포이며 부두 서비스시간은 음의 지수 분포에 따라 변한다고 가정하여 대기행렬식은 얼랑(erglang) 누적 확률분포 함수를 이용하고 있다. 이들 분포 형태에 대한 평가는 실증분석 과정에서 선박도착의 시간 및 부두 서비스시간 등의 통계자료인 누적분포도를 통해 확인할 수 있다. 이때 얼랑누적 확률분포 함수는 식 (2)와 같다(Gulf Publishing Company 1976).



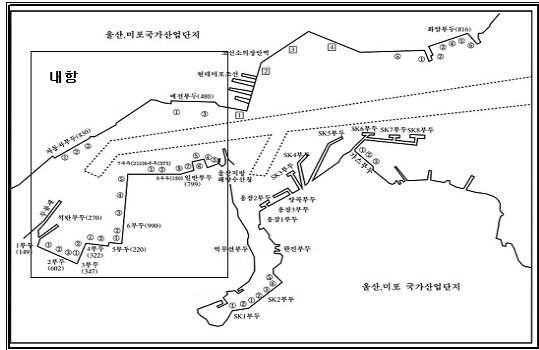
[그림 1] 연구 흐름도

단위 시간당 도착하는 선박의 척수를 확률변수로 하여 일정기간 동안 선박의 도착척수가 갖는 분포를 토대로 하여 어떤 특정 척수인 n이 t시간

$$P_o(t) = e^{-K\lambda t} \sum_{n=0}^{K-1} (K\lambda t)^n \frac{1}{n!} \text{----- (2)}$$

### Ⅲ. 실증 분석

울산 본항은 [그림 2]와 같이 단일 진입항로를 갖고 있으며 내항과 외항으로 구성되어 있다. 주요 선석 및 부두는 주로 내항에 존재하며 본항의 혼잡 및 선박대기는 대부분 내항에서 발생하기 때문에 내항에 입항하는 선박들을 중심으로 선박의 재항시간과 서비스 시간을 분석할 필요가 있다.



[그림 2] 울산 본항의 선석배치도

내항의 각 부두는 <표 2>와 같이 기능상 석탄화물용, 컨테이너화물용, 액체화물용 및 일반화물용 부두 등으로 나눈다.

실증 분석을 위해 잡화부두 중 사용하지 않거나 영향력이 미미한 전계지 및 모래부두는 조사대상에서 제외하였다. 조사에 사용된 자료는 2005년 1월 1일부터 2005년 12월 31일까지 내항에 입항한 선박을 대상으로 각 부두별 물동량을 산정하였다.

입항한 선박은 MB1~MB9부두에서 4,477척, MBT부두에서 90척, MBG3~MBG8부두에서 865척, MBJ부두에서 1,023척으로 총 6,455척이지만 급유선, 급수선, 예인선은 제외하고 외항선 6,192척을 실제 조사 대상으로 하였다.

<표 2> 울산 내항의 부두별 선석 수 및 기능

부두명	선석 수	기능	Port-MIS 입력 기호	선석 길이 등 기타
석탄부두	1	석탄	MBT	석탄전용 부두로 사용
1부두	1	일반	MB1-01	잡화, 중형선 2척 동시 접안
2부두	3	일반	MB2-01 MB2-03	01:사료, 02:암모니아 및 잡화, 삼성정밀, 03:케미컬 및 시멘트
3부두	2	액체	MB3-01 MB3-02	케미컬, 01: 사료, 02: 케미컬(보폭1), S/T 또는 BOW사의 대형선 접안
4부두	2	액체	MB4-01 MB4-02	01: 보폭1, S/T, BOW사의 대형선 접안, 02: 동부한농 비료 원료
5부두	1	일반	MB5-01	wood chip, 원당, 철재, 대형선
6부두	4	컨테이너	MB6-01 MB6-02	컨테이너 전용, 30,000톤급 대형선 2척 접안
		액체	MB6-03	케미컬 및 잡화, 보폭2, S/T
		일반	MB6-04	잡화 등, 대형선 접안
7부두	1	일반	MB7-01	잡화 등, 대형선 접안
8부두	2	일반	MB8-01 MB8-02	잡화 등, 대형선 접안
9부두	1	일반	MB9-01	잡화 등, 대형선 접안
잡화 부두	8	전계지	MBC-01 MBC-02	예인선 전계지로 사용하다가 수심이 낮아 현재 사용 안함.
		모래	MBC-03	모래선 전용 부두
		일반 부두	MBC-04 ... MBC-08	잡화, 수리 등, 04: 500톤, 05: 1000톤, 06: 5000톤, 07-08: 5000톤급 중형선 접안
		자동차	MBJ-01 ... MBJ-03	자동차 전용, PCC 대형선 3척 접안

이러한 기초 자료를 통해 대상 선박의 입항시각, 접안시각, 이안시각을 조사하여 선박도착 시간간격과 부두 서비스시간의 분포를 산출하고 이들 분포의 평균, 표준편차 등을 계산한다. 또한 묘박지의 대기척수, 대기시간, 항내이동시간, 부두별 점유율 등을 산출하여 선박재항시간을 구한다.

#### 1. 선박의 도착시간간격 분포

내항에 도착하는 일련의 선박과 선박간의 도착 시간간격 분포는 <표 3> 및 <표 4>와 같다. 선박 도착시간 기준은 석탄부두와 컨테이너부두가 5시간, 액체부두와 일반부두가 2시간 간격으로 한다.

<표 3> 석탄 및 컨테이너부두 선박도착시각 간격 분포

도착시각 간격	석탄 부두	컨테이너 부두	도착시각 간격	석탄 부두	컨테이너 부두
0~4.99	0	307	120~124.99	2	0
5~9.99	0	231	125~129.99	2	0
10~14.99	1	150	130~134.99	0	0
15~19.99	0	88	135~139.99	0	0
20~24.99	1	51	140~144.99	2	0
25~29.99	0	21	145~149.99	1	0
30~34.99	1	14	150~149.99	0	0
35~39.99	0	7	155~159.99	2	0
40~44.99	0	8	160~164.99	3	0
45~49.99	0	1	165~169.99	3	0
50~54.99	1	2	170~174.99	2	0
55~54.99	0	0	175~179.99	5	0
60~64.99	0	0	180~184.99	6	0
65~69.99	0	0	185~189.99	5	0
70~74.99	1	0	190~194.99	7	0
75~79.99	0	0	195~199.99	4	0
80~84.99	0	0	200~204.99	2	0
85~89.99	1	0	205~209.99	1	0
90~94.99	1	0	210~214.99	1	0
95~99.99	1	0	215~219.99	0	0
100~104.99	2	0	220~224.99	1	0
105~109.99	1	0	225~229.99	0	0
110~114.99	1	0	230~234.99	0	0
115~199.99	2	0	235 이상	0	0

<표 4> 액체 및 잡화부두 선박 도착시각 간격 분포

도착시각 간격	액체 부두	일반 부두	도착시각 간격	액체 부두	일반 부두
0~1.99	662	2309	36~37.99	0	0
2~3.99	291	547	38~39.99	1	0
4~5.99	243	239	40~41.99	0	0
6~7.99	167	126	42~43.99	1	0
8~9.99	125	94	44~45.99	0	0
10~11.99	105	33	46~47.99	0	0
12~13.99	94	27	48~49.99	1	0
14~15.99	40	21	50~51.99	0	0
16~17.99	30	13	52~53.99	0	0
18~19.99	16	5	54~55.99	0	0
20~21.99	15	3	56~57.99	0	0
22~23.99	13	2	58~59.99	0	0
24~25.99	7	1	60~61.99	0	0
26~27.99	5	0	62~63.99	0	0
28~29.99	2	0	64~65.99	0	0
30~31.99	2	0	66~67.99	0	0
32~33.99	2	1	68~69.99	0	0
34~35.99	1	0	70 이상	0	0

선박간의 평균도착시간은 석탄부두 155.8시간, 컨테이너부두 10.1시간, 액체부두 5.5시간, 일반부두 2.5시간이며, 관측된 분포의 표준편차는 각각 석탄부두 48.21, 컨테이너부두 8.59, 액체부두 5.64, 일반부두 2.93시간이다. <표 3> 및 <표 4>에서 선박의 도착시간 간격은 음의 지수분포(exponential distribution)로 확인되어 울산 내항에 도착하는 일련의 선박과 선박간의 도착시간간격 분포는 포아송 분포로 취급한다.

## 2. 부두별 서비스시간 분포

선박이 부두에서 받은 서비스시간 간격은 예비 분석을 통해 석탄부두, 컨테이너부두, 액체부두 및 일반부두를 각각 5시간으로 분류하였다. 각 선박이 부두에 서비스를 받았던 평균시간은 석탄부두 75.1시간, 컨테이너부두 8.3시간, 액체부두 16.9시간 및 일반부두 29.8시간이며, 관측된 분포의 표준편차는 각각 석탄부두 40.96, 컨테이너부두 8.51, 액체부두 18.48, 일반부두 33.90시간이다.

부두 서비스시간 분포는 <표 5>에서 열량분포를 따른다는 것을 확인하였고, 이때 열량분포의 위상은 K=1로 근사화 할 수 있다.

<표 5> 부두별 서비스 시간 분포

서비스 시간 간격	석탄 부두	컨테 이너	액체 부두	일반 부두	서비스 시간 간격	석탄 부두	컨테 이너	액체 부두	일반 부두
0~4.99	0	343	174	517	90~94.99	7	0	2	21
5~9.99	4	303	541	659	95~99.99	6	0	3	14
10~14.99	2	125	428	401	100~104.99	5	0	7	14
15~19.99	1	66	289	231	105~109.99	5	0	1	15
20~24.99	2	22	170	298	110~114.99	3	0	3	6
25~29.99	8	12	65	267	115~199.99	3	0	2	14
30~34.99	2	7	30	226	120~124.99	2	0	4	17
35~39.99	2	0	22	92	125~129.99	1	0	4	11
40~44.99	1	1	10	61	130~134.99	0	0	1	7
45~49.99	1	1	12	104	135~139.99	0	0	0	7
50~54.99	0	0	10	95	140~144.99	0	0	0	4
55~59.99	0	0	8	73	145~149.99	1	0	1	10
60~64.99	0	0	4	29	150~154.99	0	0	1	6
65~69.99	0	0	10	25	155~159.99	0	0	1	5
70~74.99	0	0	5	56	160~164.99	1	0	0	2
75~79.99	0	0	5	38	165~169.99	0	0	0	5
80~84.99	6	0	3	27	170~174.99	0	0	0	7
85~89.99	1	0	5	12	175 이상	0	1	2	47

### 3. 부두별 점유율 분포

울산 내항의 부두별 점유율 분포는 <표 6>과 같다. 컨테이너부두인 6부두가 가장 낮은 점유율을 보인 것은 주로 적당 하역시간이 짧은 컨테이너 선박이 입항하였기 때문이다. 선석이 3개인 자동차부두의 점유율이 낮은 이유는 일반 화물선에 비해 하역시간이 짧은 자동차 전용선이 입항하였기 때문이다. 일반부두 중 점유율이 높은 5부두는 대형선이 접안하여 주로 고철, 소금, 광석 및 원당 등을 양적하 하기 때문에 상대적으로 부두에 머무는 시간이 길어서 점유율이 높다.

<표 6> 부두별 점유율 분포

부두별 기능	부두명	선석수	이용척수	선석당 이용척수	선박점유율 (일/척)
석탄부두	석탄부두	1	64	64.0	5.70
컨테이너 부두	6부두	2	881	440.1	0.83
	3부두	2	669	334.5	1.09
	4부두	2	836	418	0.87
액체부두	6부두	1	319	319	1.14
	1부두	1	133	133	2.72
	2부두	3	589	196.3	1.86
일반부두	5부두	1	97	97	3.76
	6부두	1	239	239	1.53
	7부두	1	158	158	2.30
	8부두	2	271	135.5	2.68
	9부두	1	136	136	2.68
	잡화부두	5	805	161.0	2.27
자동차부두	자동차 부두	3	995	331.67	1.10
합 계		26	6,192	238.2	1.53

### 4. 선석 이용률과 대기시간

항만에서 선박의 대기시간을 추정하기 위해서는 선박이 입항하는 시각, 접안하는 시각 및 이안하는 시각에 대한 자료가 필요하며, 이러한 자료로부터 분석되는 주요 확률변수는 선박의 도착시간간격과 부두서비스시간이다.

대기행렬에서 예상되는 대기시간과 대기척수는 통계적인 자료와 적절한 모델로부터 계산할 수 있으며, 사용되는 매개변수는 평균도착률( $\mu$ ), 평

균서비스율( $\lambda$ ), 서비스 창구의 수(N), 그리고 선석 이용률( $\rho$ )이다. 일반적으로 다중창구와 무제한적인 대기행렬 상황 하에서는 수학적인 해가 존재할 수 없지만, 울산 내항은 하나의 진입항로를 따라 선박이 입항하는 단일경로로 음의 지수분포를 갖는 선박도착 분포와 열량 서비스 분포를 갖는 N개의 단일처리 시스템으로 모델링 할 수 있으므로, 선박대기시간은 대기행렬식 (3)으로 표현 된다(森村英典大前義次 1977).

$$W_q = \frac{\rho^2(K+1)}{2K \cdot \lambda(1-\rho)} \text{ ----- (3)}$$

단,  $\lambda$ = 선박의 평균도착률(척/시간),  $\mu$ = 선박의 평균서비스율(척/시간), N= 서비스 창구의 수(선석 수),  $\rho$ = 선석 이용률( $\lambda / N\mu$ ), K= 위상

식 (3)을 이용하여 울산 내항의 선선이용률과 선박대기시간을 계산하면 <표 7>과 같다. 현재 울산 내항의 선석 이용율은 석탄부두가 0.48, 컨테이너부두가 0.41, 액체부두가 0.61, 일반부두가 0.64이고 선박대기는 석탄부두에서 69.8시간, 컨테이너부두에서 2.9시간, 액체부두에서 5.3시간, 일반부두에서는 2.8시간의 대기시간이 발생하고 있다.

<표 7> 선석 이용률 및 대기시간

평가	석탄부두	컨테이너부두	액체부두	일반부두
선석수(N)	1	2	5	19
서비스 척수	64	881	1824	3423
부두서비스시간 총계	4805	7312.5	30795	101917.5
부두평균서비스시간	75.07813	8.30023	16.88322	29.77432
부두평균서비스율( $\mu$ )	0.013319	0.12047859	0.0592304	0.033586
선박도착시간 총계	9817	8850	10111	8414
선박평균도착시간	155.8333	10.0568	5.54635	2.458796
선박평균도착률( $\lambda$ )	0.006417	0.09943521	0.1802987	0.4067031
선석 이용률( $\rho$ )	0.481795	0.41266755	0.6088045	0.637332
대기 시간	69.80303	2.91592569	5.2549589	2.7538788

## Ⅳ. 민감도분석 실험

### 1. 민감도 실험

미래 상황이 불확실할 때 의사결정에 이용되는 모든 변수가 확실하다고 가정하고 분석하는 추정 시스템은 오류를 내포한다. 이러한 오류를 감소시키기 위해 다른 변수들의 조건은 고정시키고, 어느 한 투입 변수만을 변동시켜 결과 값이 어느 정도 변동될 수 있는가를 분석하는 것을 민감도 분석이라 한다.

혼잡도 모형에서의 민감도 분석은 대기행렬식 (3)에 선박평균도착률을 파라미터로 사용하고 이 파라미터가 취할 수 있는 여러 가능한 값을 변화시켜 결과의 변화를 분석하는 것을 의미한다. 이때 결과 값의 변화가 크면 민감도가 커지고 민감도가 클수록 항만의 혼잡도는 증대 되어 더 복잡한 상황으로 평가된다. 이러한 민감도 분석은 항만 개발의 여러 대안들의 상대적인 위험을 측정하는 수단이 된다.

따라서 이 연구에서는 선박평균도착률이 몇 단계로 증가되는 경우와 특정 항만의 기능 일부가 정지된 경우를 개별 시나리오로 구성한다. 시나리오에 사용된 적용계수는 항만운영에 미치는 영향 등을 고려하여 항만관련업계 및 학계 전문가의 의견을 반영하였다.

#### 1.1 시나리오-A : 선박평균도착률이 5% 증가한 경우

울산 내항의 선박평균도착률이 5% 증가한 경우 선석 이용률은 <표 8>과 같이 석탄부두에서 0.51, 컨테이너부두에서 0.43, 액체부두에서 0.64, 일반부두에서 0.67이고 선박대기는 석탄부두에서 76.9시간, 컨테이너부두에서 3.2시간, 액체부두에서 6.0시간이고 일반부두에서는 3.2시간의 대기가 발생하였다.

<표 8> 시나리오-A의 선석 이용률 및 대기시간

부두별	석탄부두	컨테이너부두	액체부두	일반부두
선석수(N)	1	2	5	19
서비스 척수	64	881	1824	3423
부두서비스시간 총계	4805	7312.5	30795	101917.5
부두평균서비스시간	75.07813	8.30023	16.88322	29.77432
부두평균서비스율( $\mu$ )	0.013319	0.12047859	0.0592304	0.033586
선박도착시간 총계	9349.456	8428.6	9629.5	8013.3
선박평균도착시간	148.4041	9.5779018	5.2822295	2.3417103
선박평균도착률( $\lambda$ )	0.006738	0.104407	0.189314	0.4270383
선석 이용률( $\rho$ )	0.505903	0.43330106	0.639246	0.6691987
선박 대기시간	76.87219	3.17319862	5.9833183	3.1701229

#### 1.2 시나리오-B : 선박평균도착률이 10% 증가한 경우

울산 내항의 선박평균도착률이 10% 증가한 경우 선석 이용률은 <표 9>와 같이 석탄부두에서 0.53, 컨테이너부두에서 0.45, 액체부두에서 0.67, 일반부두에서 0.70이고 선박대기는 석탄부두에서 84.7시간, 컨테이너부두에서 3.4시간, 액체부두에서 6.8시간, 일반부두에서는 3.7시간의 대기가 발생하였다.

<표 9> 시나리오-B의 선석 이용률 및 대기시간

부두별	석탄부두	컨테이너부두	액체부두	일반부두
선석수(N)	1	2	5	19
서비스 척수	64	881	1824	3423
부두서비스시간 총계	4805	7312.5	30795	101917.5
부두평균서비스시간	75.08	8.30023	16.88322	29.77432
부두평균서비스율( $\mu$ )	0.013319	0.12047859	0.0592304	0.033586
선박도착시간 총계	8924.259	8045.4	9191.816	7649.0913
선박평균도착시간	141.6549	9.14252279	5.0421371	2.2352692
선박평균도착률( $\lambda$ )	0.007059	0.109379	0.1983286	0.4473734
선석 이용률( $\rho$ )	0.530007	0.45393543	0.6696851	0.7010652
선박 대기시간	84.66505	3.44991383	6.8458551	3.6751086

#### 1.3 시나리오-C : 선박평균도착률이 15% 증가한 경우

울산 내항의 선박평균도착률이 15% 증가한 경우 선석 이용률은 <표 10>과 같이 석탄부두에서 0.55, 컨테이너부두에서 0.47, 액체부두에서 0.70, 일반부두에서 0.73이고 선박대기는 석탄부두에서 93.3시간, 컨테이너부두에서 3.7시간, 액체부두에



서 7.9시간, 일반부두에서는 4.3시간의 대기가 발생하였다.

우이다. 이때 선석 이용률은 0.71이고 선박 대기는 4.3시간이 발생하였다.

<표 10> 시나리오-C의 선석 이용률 및 대기시간

부두별	석탄부두	컨테이너부두	액체부두	일반부두
선석수(N)	1	2	5	19
서비스 척수	64	881	1824	3423
부두서비스시간총계	4805	7312.5	30795	101917.5
부두평균서비스시간	75.07813	8.30023	16.88322	29.77432
부두평균서비스율( $\mu$ )	0.013319	0.12047859	0.0592304	0.033586
선박도착시간 총계	8536.54	7695.67118	8792.1732	7316.5217
선박평균도착시간	135.5006	8.74508089	4.8229145	2.1380835
선박평균도착률( $\lambda$ )	0.00738	0.11435	0.2073435	0.4677086
선석 이용률( $\rho$ )	0.55408	0.47456565	0.7001252	0.7329318
선박 대기시간	93.28851	3.74833131	7.8835353	4.3006068

## 2. 민감도분석 결과

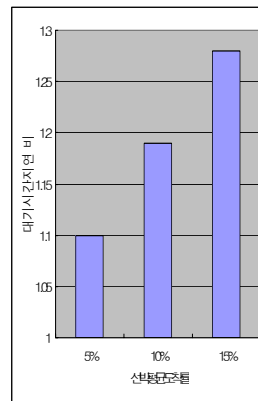
5가지의 시나리오 설정에 따라 민감도를 실험한 결과, [그림 3]과 같이 가장 일반적인 컨테이너부두를 기준으로 비교하면 현재보다 선박의 평균 도착률이 5% 증가될 때 대기시간은 약 1.1배 지연되고, 10% 증가될 때 대기시간은 1.19배 지연되며, 대기시간이 15% 증가될 때 대기시간은 1.28배로 지연이 발생하였다. [그림 4]는 부두의 기능정지와 관련하여 일반부두인 9부두와 잡화부두 8번 선석의 기능이 50% 정지될 경우 일반부두를 기준으로 선박의 대기시간은 현재보다 1.21배로 지연되었고, 100% 기능이 정지되면 대기시간은 1.53배로 크게 지연되었다.

### 1.4. 시나리오-D : 9부두와 잡화부두 8번 선석의 기능이 50% 정지된 경우

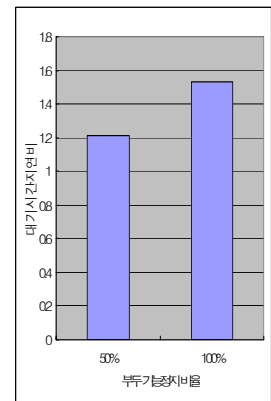
<표 11>에서 시나리오-D는 울산 내항의 9부두와 잡화부두 8번 선석의 기능이 50% 정지된 경우이다. 이때 선석 이용률은 0.67로 나타났고 선박 대기는 3.40시간이 발생하였다.

<표 11> 시나리오-D와 시나리오E의 선석 이용률 및 대기시간 (일반부두 기준)

부두별	시나리오-D	시나리오-E
선석수(N)	18	17
서비스 척수	3423	3423
부두서비스시간 총계	101917.5	101917.5
부두평균서비스시간	29.77432	29.77432
부두평균서비스율( $\mu$ )	0.033586	0.033586
선박도착시간 총계	8414	8414
선박평균도착시간	2.458796	2.458796
선박평균도착률( $\lambda$ )	0.4067031	0.4067031
선석 이용률( $\rho$ )	0.6727394	0.7123123
대기 시간	3.4003408	4.3365269



[그림 3] 선박평균도착률에 따른 대기시간 변화율



[그림 4] 부두기능정지비율에 따른 대기시간 변화율

### 1.5. 시나리오-E : 9부두와 잡화부두 8번 선석의 기능이 100% 정지된 경우

<표 11>에서 시나리오-E는 울산 내항의 9부두와 잡화부두 8번 선석의 기능이 100% 마비된 경

우이다. 이때 선석 이용률은 0.71이고 선박 대기는 4.3시간이 발생하였다. 선박평균도착률의 증가에 따른 대기시간 지연은 운송시스템의 효율 감소와 항만의 병목현상을 초래하여 총 물류비용을 증가시켜 울산항 전체의 경쟁력을 약화시킬 수 있다. 또한 부두의 기능정지에 따른 대기시간 지연은 물류 서비스의 만족도를 감소시켜 항만운영 및 물류환경을 악화시키

는 직접적인 요인이 된다.

부산 신선대부두의 경우 적당 평균 대기시간이 0.8시간인데 비해 울산 내항은 2.9시간이며, 선박 평균도착률이 단지 5% 증가된 경우에도 컨테이너 부두의 대기시간은 3.2시간으로 증가되므로 울산 항의 경쟁력은 매우 낮은 것으로 나타났다. 또한 울산 내항의 선박입항 추이가 10년을 주기로 2배씩 증가하고 있고, 연도별 수입화물, 수출화물, 연안화물, 환적화물이 모두 지속적으로 성장하는 추세를 보이고 있어, 울산 내항의 화물 처리 시설은 지속적으로 확충할 필요가 있다. 또한 항만관리라는 측면에서 항만 및 부두공사와 같은 외적 환경 요인에 의해 일부 선석이 제 기능을 발휘할 수 없는 경우, 특정부두의 대기시간이 크게 증가되므로 이에 대한 대비도 마련할 필요가 있다.

## V. 결론

이 연구에서는 선박평균도착률의 변경과 일부 선석의 기능을 정지시킨 시나리오에 따라 부두의 대기시간을 계산하고 평가하여 울산 내항의 혼잡 정도를 정량적으로 분석하였다. 혼잡 분석을 위해 선박대기시간의 변화량을 측정하는 대기행렬 이론을 이용하였다. 대기행렬의 실증분석을 위해 울산 내항의 부두별 선석 수 및 기능을 확인하고 선박의 도착시간간격 분포, 부두별 서비스시간 분포, 부두별 점유율 분포를 조사하여 단일경로·단일처리 시스템으로 대기행렬 식을 모델링 하였다. 또한 작성된 시나리오에 따라 대기행렬 식을 이용하여 선석 이용률과 대기시간을 계산하고 민감도를 분석하였다.

민감도 분석 결과, 선박평균도착률의 증가는 선박의 대기시간을 증대시켜 물류 서비스를 약화시켰으며, 일부 선석의 기능 정지는 선박의 대기시간을 크게 지연시킬 수 있음을 확인하였다. 따라서 물동량의 급속한 증가와 같은 상황변화와 일부 부두의 보수로 기능정지가 발생하는 환경변

화에 보다 탄력적으로 대응하기 위해 다각적인 항만개발 전략과 항만관리 방안을 계획할 필요가 있다. 그러나 이 연구에서는 다양한 대기행렬모델로부터 적합한 모델 식을 선정하기 위해 이론적 계산값과 통계적 실측값을 비교하는 검증실험은 수행하지 못하였다. 이 문제는 모델의 적합성 검증을 고려하는 향후 연구에서 개선하고자 한다.

## 참고 문헌

- 구자윤(1997). 항계내 항로의 해상교통 혼잡도 평가에 관하여, 한국항만학회지, 11(2), 173~189.
- 구자윤, 여기태(2000). 감만부두 확장구역 개장과 기타 항만개바리 장래 부산 북항에 미치는 해상교통 혼잡도 평가에 관하여, 한국항만학회, 14(1), 27~35.
- 구자윤, 여기태(2001). 진입항로에 대한 해상교통 혼잡도 평가, 한국해운학회지, 제33호, 113~129.
- 여기태, 이홍걸, 석상문, 이철영(1998). 부산항 해상교통 혼잡도 평가에 관한 연구, Journal of Port and Harbor Research, vol.9, 1~17.
- 울산지방해양수산청(2007) 항만정보통계자료, ([http://ulsan.momaf.go.kr/board/list\\_board.asp?bca=41](http://ulsan.momaf.go.kr/board/list_board.asp?bca=41)).
- 윤원영, 최용석, 송진영(2001). 컨테이너 크레인의 하역능률 분석에 대한 시뮬레이션, 한국경영과학회/대한산업공학회 춘계공동학술대회논문지, 349~352.
- 이영찬, 박남규, 서창갑(2006). 컨테이너항만의 선박 접안 시뮬레이션 모델링을 위한 기초자료 분석, 한국정보시스템학회, 춘계학술대회논문지, 265~271.
- 해양수산부(2007). 해양수산통계자료 (<http://www.momaf.go.kr/>).
- 森村英典大前義次(1977). 應用待期行列理論 2, 日科技連出版社, 58-6.
- D. Gross and C. Harris(1985). Fundamentals of Queueing Theory pp.10, John Wiley & Sons.
- ESCAP(1990.11), ESPOCA MANUAL, p.2.
- Gulf Publishing Company(1976). Port Engineering per Brum, 245~255, Book Publishing Division, Huston.