

# 시뮬레이션 기법을 활용한 울산항의 적정 예선 척수 분석

박준모\*†

\* 목포해양대학교 항해학부 교수

## Analysing Optimum Tugboat Capacity in Ulsan Port by Simulation Technique

Jun-Mo Park\*†

\* Professor, Division of Navigation Science, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

**요약** : 선박의 안전한 접·이안을 담당하는 예선은 항만의 안전하고 효율적인 운영을 위한 여러 요소들 중 무엇보다 중요한 사항이라고 할 수 있다. 그러나 항만의 특징에 따라 보유해야 하는 적정 예선 척수 및 규모에 대한 연구가 부족한 상황이고, 이로 인하여 관계자 간 분쟁이 자주 발생하고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 울산항을 중심으로 시뮬레이션 기법을 사용하여 예선의 적정 척수 및 예선 마력 비율을 제시하였다. 먼저, 시뮬레이션 구축을 위한 첫 번째 과정으로 항만 입·출항 및 예선 운영 시스템을 설계하였다. 다음으로, 모델링 시 정의한 입력 변수는 울산항의 2019년 선박 입·출항 데이터를 조사하여 도출하였으며, ARENA 소프트웨어에 입력 가능한 형태로 표준화하였다. 그리고 선박의 입·출항 프로세스를 설계하고, 이를 ARENA 모델로 구현하였다. 마지막으로 6가지의 시나리오에 대한 시뮬레이션 수행 결과, 울산항의 예선 척수를 42척으로 조정할 경우 효과적인 예선 운영이 가능한 것으로 도출되었다.

**핵심용어** : 예선, 울산항, 시뮬레이션 기법, ARENA 소프트웨어, 적정 예선 척수

**Abstract** : The use of tugboats for the safe berthing/unberthing of ships is the most crucial factor in the safe and efficient operation of the harbor. However, the adequate number and size of tugboats that should be held based on the characteristics of the port have not been investigated in detail, which causes disputes between involved parties. Therefore, the suitable number of tugboats and the ratio of the tugboat horsepower were determined in this study using simulation techniques, with focus on Ulsan Port. First, the ship and tugboat-operating models were designed for simulation application. Next, the input variables defined in the model design were standardized in an inputtable form using ARENA software. In addition, the arrival and division process of the ship was designed and simulated as an ARENA model. Finally, the simulation results for six scenarios showed that an effective tugboat operation could be achieved when 42 tugboats were held at Ulsan Port.

**Key Words** : Tugboat, Ulsan port, Simulation Technique, ARENA software, Optimum tugboat capacity

### 1. 서론

예선은 입·출항 선박을 부두나 계류시설에 안전하게 접·이안시키는 지원 업무를 수행하는 선박이다. 이는 선박이 안전하게 항만을 입·출항하는데 있어서 항만관제시스템, 도선 서비스와 더불어 매우 중요한 역할을 담당한다.

1995년 우리나라는 항만 예선 사업을 위한 진입 제도를 허가제에서 등록제로 전환함으로써 자격조건만 갖추면 누구나 예선시장에 진입할 수 있게 되었다.

그 결과, 제도 전환 전인 1995년에는 28개사 113척이었던 예선 규모가 2019년 1월 1일 기준으로 77개사 305척으로 큰 폭으로 증가하게 되었다(KTC, 2019).

그러나 최근 최첨단 대형선박의 출현과 입·출항 선박 척수 감소로 예선의 수요가 감소하게 되었고, 자연스럽게 예선의 공급과잉에 따른 출혈 경쟁, 서비스 질 하락, 그리고 이로 인한 입·출항 선박의 안전 문제가 대두되고 있다.

이에 한국예선업협동조합은 두 차례에 걸쳐 항만별 예선 적정 척수 산정을 위한 연구(KTC, 2015; KTC, 2018)를 실시하였다. 그러나 이 연구는 선박이 항만을 입·출항하는 시간의 불규칙성을 적절히 고려하지 않았고, 단지 결정론적 방

† jmpark@mmu.ac.kr, 061-240-7180

법인 추세분석모델(Trend Analysis Models)만을 사용하여 적정 예선 척수 규모를 추정하였다는 점에서 결과의 신뢰성이 문제로 지적되었다.

이로 인해, 해양수산부는 연구 결과를 근거로 한 항만별 예선 수급계획이 아닌 2019년 1월 1일 항만별 예선 척수를 기준으로 2019년부터 2021년까지의 예선 수급계획을 발표하였고(MOF, 2019), 결과적으로 과잉된 예선시장의 수급 조절을 위해 입법한 선박의 입항 및 출항 등에 관한 법률 제25조의2(예선의 수급조절) 조항이 무색해진 상황이 되었다.

항만의 적정 예선 규모와 관련된 선행 연구로는 시뮬레이션 방법론을 활용하여 효율적인 예선 선대 규모를 결정한 Bondarenko et al.(2018)의 연구, 항만의 대기 시간을 최소화하기 위해 필요 예선 척수를 결정한 Shahpanah et al.(2014)의 연구, 그리고 항만의 효율적인 운영을 위해 예선의 적정 척수를 제시한 Jeong(2016)의 연구가 대표적이다.

그러나 기존 연구는 선박이 항만을 입·출항하는 시간의 불규칙성을 고려하지 않았다. 또한 항만에 따라 특정 시간에 입·출항 선박이 집중되는 특성을 고려하지 못했다는 한계점이 있다고 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 입·출항 선박의 peak time을 고려한 선박의 운항 패턴, 실질적인 예선운용 상황, 선박의 입·출항 지원 작업 소요시간 등을 입력변수로 설정하였다. 그리고 복잡한 항만 환경을 컴퓨터 가상공간에 모델링한 후 통계적 실험을 수행할 수 있는 시뮬레이션 기법을 활용한 분석을 실시하였다. 그리고 시뮬레이션 분석을 통해 항만의 적정 예선 척수 뿐 아니라 예선 마력별 척수 비율도 제시하였다.

본 연구는 우리나라 무역항 중에서 위험화물운반선의 입·출항 비율이 가장 높고, 예선 척수가 48척으로 가장 많으며, 예선업체 간에 마찰이 자주 발생하고 있는 울산항을 연구 범위로 설정하여 조사·분석하였다(IUSM, 2015).

예선은 항만의 효율성 향상 뿐 아니라 입·출항 선박의 안전 도모 측면에서 매우 중요한 역할을 한다고 할 수 있다. 이러한 측면에서 볼 때 이 연구는 항만별 적정예선 척수를 결정하는데 좀 더 객관적인 방법론을 제시해 줄 수 있으며, 나아가 항만계획을 수립할 때 예선 정계지 설계 시 참고자료로 활용할 수 있을 것이라고 판단된다.

## 2. 연구개요

### 2.1 울산항 항만 현황

Table 1은 울산 본항, 온산항, 미포항, 그리고 울산 신항의 부두 시설 상세를 나타낸다. 울산항의 규모는 총 115척이 동시에 입항할 수 있는 길이 20,668m의 안벽을 보유하고 있으며, 접안능력은 3,678,500 dwt이다(MOF, 2020).

울산항 부두 중 울산 본항이 가장 큰 규모이며, SBM(Single buoy mooring) 2기가 포함되어 있다. 또한 온산항은 주로 액체화물을 처리하는 부두로 SBM 1기가 포함되어 있다.

Table 1. Harbour facilities in Ulsan port

Ports	Items	Berth length (m)	Ships	Berthing capacity (dwt)
Ulsan main port		10,085	61	1,818,500
Onsan port		5,073	31	1,157,000
Mipo port		210	1	20,000
Ulsan new port		5,300	22	683,000
Total		20,668	115	3,678,500

### 2.2 울산항 예선 현황

울산항 입·출항 선박이 접·이안 할 때 기본적으로 울산항 예선운용세칙(울산지방해양수산청고시 제2018-88호)의 기준에 의거하여 적정한 예선의 척수를 사용해야 한다.

Table 2는 울산항 예선운용세칙을 나타낸 것으로, 입·출항 선박 중 총톤수 1,500톤 이상 선박은 총톤수 및 입·출항 부두에 따라 예선을 사용하도록 함을 의미한다. 다만, 총톤수 1,500톤 미만의 선박이라 할지라도 도선사와 선장의 의견을 들어 사용할 수 있도록 규정하고 있다.

Table 2. Rules for tugboat operation in Ulsan port

Tug enabled ship (G/T)	HP class (HP)	Total usage HP (HP)
Under 5,000 G/T	1,000	Under 2,000
5,000 ~ Under 10,000	1,000	2,000 ~
10,000 ~ Under 20,000	2,000	4,000 ~
20,000 ~ Under 30,000	2,000, 3,000	5,000 ~
30,000 ~ Under 50,000	3,000, 4,000	7,000 ~
50,000 ~ Under 70,000	4,000, 5,000	8,000 ~
70,000 ~ Under 100,000	4,000 ~ 6,000	10,000 ~
100,000 ~	5,000, 6,000	13,500 ~
90,000 ~ (Crude oil ship using SBM)	4,000 ~ 6,000 4,000	Berthing: 10,000 ~ Unberthing: 4,000 ~
Under 90,000 (Crude oil ship using SBM)	4,000 ~ 6,000 4,000	Berthing: 9,000 ~ Unberthing: 4,000 ~

Table 3은 울산항에 배치되어 있는 예선의 마력별 척수를 나타낸 것으로, 울산항은 총 48척의 예선을 운영하고 있음을 알 수 있다.

Table 3. Number of tugboat in Ulsan port

HP class (HP)	Number of tugboats	Ratio (%)
1,000	14	29.1 %
2,000	8	16.7 %
3,000	11	22.9 %
4,000	7	14.6 %
5,000	3	6.3 %
6,000	5	10.4 %
Total	48	100 %

울산항 예선의 규모는 1,000마력급~3,000마력급 예선이 전체의 68.7%를 차지하며, 5,000마력급~6,000마력급은 16.7%로 상대적으로 낮은 것으로 나타났다.

### 2.3 연구방법

울산항의 적정 예선 척수 분석을 위한 연구 방법으로 시뮬레이션 기법을 사용하였다. 시뮬레이션 기법은 복잡한 전체 시스템을 표현하고 동시에 시스템 입력 요소와 출력 요소 간의 관련성을 표현할 수 있다(Jeong, 2016). 또한 실제 시스템을 모사하여 구축하기 때문에 현재의 현상 뿐 아니라 미래의 환경에 대한 결과 값을 도출하고 이에 대한 변화 양상을 파악할 수 있는 장점이 있다.

이에 본 연구에서는 항만 분야에서 많이 사용하는 ARENA 시뮬레이션(v.15.1) 소프트웨어를 사용하여 Fig. 1과 같이 울산항 항만 환경을 가상환경에 모사하고 구축된 모델링의 적정성 여부를 검증한다. 그리고 검증된 모델링을 이용하여 시뮬레이션을 수행하고, 이를 통해 결과를 도출하는 순서로 진행하였다.



Fig. 1. Research methodology.

## 3. 시뮬레이션 설계

### 3.1 항만 입·출항 및 예선운영 시스템 설계

Fig. 2는 울산항 예선 운영 시스템을 프로그램으로 구현하기 위한 시스템 설계 그림이다. 즉, 입력변수는 울산항 입·출항 선박 척수, 선박 도착 및 출항 간 시간 간격, 예선 운영 규칙, 입항 선박 톤수 분포, 입항 선박 시간별 분포, 그리고 울산항 예선 서비스 시간으로 설계하였다. 그리고 출력 변수로는 생성된 선박 척수, 일일 예선 운영 척수, 일일 예선 마력별 운영 척수, 전체 시뮬레이션 시간, 연간 예선 이용

선박 척수로 설계하여 시뮬레이션 모델링의 타당성 검증 및 결과도출에 활용하였다.

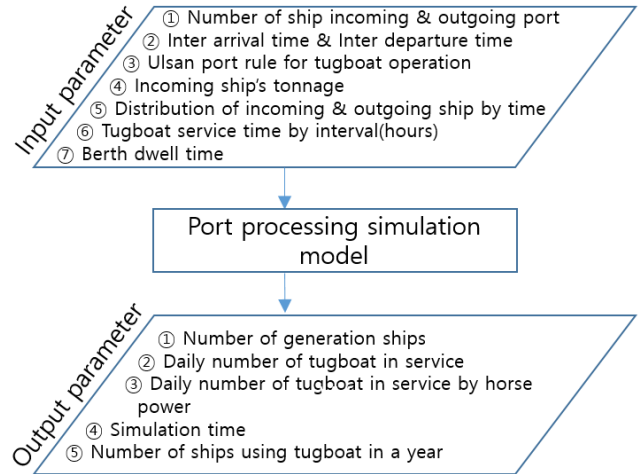


Fig. 2. The simulation system architecture.

### 3.2 입력변수 수집 및 표준화

위의 3.1절에서 정의한 모델링 입력변수를 소프트웨어에 입력하기 위해서는 표준화 작업이 필요하다. 이에 본 연구에서는 울산항의 2019년 자료를 수집하고, 이를 표준화하는 작업은 ARENA 시뮬레이션 소프트웨어에서 제공하는 Input analyser를 사용하였다.

Table 4는 부두의 위치와 취급 화물을 기준으로 5개로 그룹화한 것을 나타낸다. 울산항은 부두가 매우 많고 기항 선박의 종류도 다양하기 때문에 모든 부두를 대상으로 한 시뮬레이션 모델 구축은 매우 복잡하고 어려운 작업이다. 또한 본 연구에서 구축하고자 하는 시뮬레이션 모델은 분 단 위까지의 자세한 시뮬레이션 결과는 필요하지 않다. 따라서 울산항은 취급 화물의 종류, 선종, 그리고 지리적 위치를 기준으로 부두를 5개로 그룹화하여 각각에 대해 모델링하였다. 단, 예선을 대부분 사용하지 않는 기타 계류시설 사용 선박은 조사 및 시뮬레이션 모델링에서 제외하였다.

Table 4. Standardization of inter-arrival time

Port group	Grouping method	Grouping port or facilities
Group1		Ulsan main port area
Group2		Onsan port area
Group3		Mipo port and anchorage area
Group4		Ulsan new port area
Group5		SBM

1) 선박 도착 간 시간 간격(Inter-arrival time)

일반적으로 화물 부두에 기항하는 선박들은 하역 작업 시간 등의 이유로 비슷한 시간대에 입항하게 된다. 이에 따라 특정 시간대에 입항 선박들이 몰리며, 예선 또한 동시에 많은 척수가 필요하게 된다. 따라서 이러한 사항을 반영한 모델링으로 유의미한 시뮬레이션 수행 및 결과 도출이 가능하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 입항 선박의 peak time을 반영하기 위해 울산항 입항 선박 전체의 선박 도착 간 시간간격을 함수 분포식으로 표준화하여 시뮬레이션 입력 변수로 사용하였다. 그리고 여기에서 생성된 선박을 부두 그룹별로 분류하고, 이를 다시 항만 그룹별 선박 도착 간 시간 간격을 함수 분포식으로 표준화하여 시뮬레이션 입력 변수로 사용하였다.

Table 5는 부두 그룹별로 입항 선박 간 시간 간격을 조사하여 이를 함수 분포 식으로 표준화한 결과를 나타낸다.

Table 5. Standardization of inter-arrival time

Incoming ships	Probability distribution function
Ulsan port 23,033	-0.001+EXPO(0.35)
Group1 7,494	-0.001+56*BETA(0.814, 39.3)
Group2 3,156	-0.001+GAMM(3.19, 0.87)
Group3 8,575	NORM(1.02, 94.5)
Group4 3,542	-0.001+EXPO(2.47)
Group5 266	-0.001+175*BETA(0.979, 4.18)

2) 입항선박의 톤수별 분포

울산항 입·출항 선박은 예선운영세척에서 규정하고 있는 바와 같이 선박의 톤수에 따라 사용해야 하는 예선 마력이 결정된다. 따라서 입항 선박의 톤수별 분포는 울산항의 적정 예선 척수 분석을 위한 시뮬레이션 입력 변수로서 중요한 요소이다.

Table 6은 울산항 입항 선박의 톤수별 비율을 나타낸다. 즉, 총톤수 10,000톤 이하 선박이 약 70% 이상으로 매우 높은 비율을 차지한다. 반면 그룹 5는 50% 이상이 160,000톤급 이상의 초대형 선박인 것으로 나타났다.

식(1)은 이산 확률변수(Discrete probability distribution)  $X$ 의 확률 질량함수로 표준화하는 수식을 나타내며, 본 연구에서는 항만 그룹별로 입항 선박의 톤수별 분포의 입력 변수에 대해 적용하였다.

$$P(X = x_i) = p_i (i = 1, 2, 3, \dots, n) \tag{1}$$

단,  $x_i$  : 입항선박이  $i$  톤수(변수)

$p_i$  : 입항선박이  $i$  톤수일 확률

Table 6. Standardization of tons ratio of incoming ships(%)

Group Tons(G/T)	Group1	Group2	Group3	Group4	Group5
Under 1,500	56.8	40.5	26.3	32.6	1.1
1,500~5,000	20.8	20.3	43.0	7.7	-
5,000~10,000	7.4	17.4	13.9	29.0	-
10,000~20,000	2.1	14.7	3.7	14.9	-
20,000~30,000	3.3	5.0	6.7	8.2	-
30,000~40,000	1.2	1.1	2.4	4.2	-
40,000~50,000	2.0	0.4	1.9	1.7	-
50,000~60,000	2.7	0.1	0.5	1.5	0.4
60,000~70,000	2.5	0.5	1.2	0.2	3.8
70,000~80,000	1.1	-	0.0	-	1.1
80,000~90,000	0.1	-	0.2	-	9.8
90,000~100,000	-	-	0.03	-	-
100,000~110,000	-	-	0.04	-	-
110,000~120,000	-	-	0.05	-	-
120,000~130,000	-	-	0.04	-	-
130,000~140,000	-	-	-	-	-
140,000~150,000	-	-	-	-	-
150,000~160,000	-	-	0.01	-	32.7
160,000~170,000	-	-	0.03	-	50.0
170,000~	-	-	-	-	1.1

3) 울산항 입·출항 선박의 예선 사용 비율

우리나라 항만의 예선운영기준에 대한 사항은 각 지방해양수산청의 고시로서 예선운영세척을 명시하고 있으며, 예선 사용 대상 선박, 예선 사용 기준, 그리고 사용 절차 등의 내용을 포함하고 있다.

울산항 입·출항 선박 중 예선 대상 선박은 총톤수 1,500톤 이상 선박으로 지정하고 있다. 다만, 울산지방해양수산청장 또는 도선사가 선박의 톤수와 관계없이 예선이 불필요하거나, 추가적으로 필요하다고 판단할 경우에는 고시에서 정하는 예선사용기준과는 별개로 예선을 운용할 수 있도록 하고 있다(MOF,2018)

따라서 본 연구에서는 울산항 입·출항 선박 중 예선을 사용한 선박의 비율을 조사하고 이를 시뮬레이션 모델링에 반영하여 최종적으로는 시뮬레이션 모델의 검증 자료로 활용하였다.

Table 7은 부두 그룹별 입·출항 선박의 예선 사용 비율을 나타낸다. 울산항의 예선 사용 비율이 가장 높은 그룹은 그룹 5(96.6%)이며, 나머지 그룹은 20%~30% 수준이다.

Table 7. Rate of using tugboats arrival and departure Ulsan port

Group	Items	Number of ships using tugboats	Rate
Group1		1,912	25.5 %
Group2		771	24.5 %
Group3		2,407	28.1 %
Group4		1,130	31.9 %
Group5		257	96.6 %
Total		6,477	28.1 %

4) 부두 하역작업 시간(Dwell time) 분포

Table 8은 울산항의 부두 그룹별 하역 작업을 조사하여 이를 함수분포 식으로 표준화한 결과를 나타낸다. 선박이 부두에 접안하여 화물 작업을 수행하는 시간은 화물의 종류, 선박의 크기, 화물 작업량 등에 따라 매우 다양하며, 또한 이 시간은 예선 운영에 큰 영향을 미치는 요소이다. 따라서 이 변수를 시뮬레이션의 변수로 입력할 때 평균값 또는 중앙값 등의 확정 수치가 아닌 확률변수로 입력해야 실제와 유사한 시뮬레이션을 구현할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 하역 작업 시간을 함수분포 식으로 표준화한 후 이를 시뮬레이션모델에 입력하였다.

Table 8. Probability distribution of cargo working time

Group	Items	Probability distribution function
Group1		-0.001+WEIB(43.5, 0.611)
Group2		WEIB(29.1, 0.869)
Group3		WEIB(38.2, 0.69)
Group4		WEIB(20.6, 0.693)
Group5		18+640*BETA(0.472, 6.29)

5) 구간별 예선 서비스 시간

입출항 선박에 대한 예선 서비스 순서는 일반적으로 예선 정계지 대기선박 출항, 예선 서비스 제공지점으로의 이동, 예선 종료 후 예선 정계지로 입항 후 대기로 이루어진다.

울산항의 예선 정계지는 매암부두 정계지와 남화예선부두 정계지가 있으며, 해당 부두에 예선 48척이 대기하고 있다. 그리고 예선 정계지별로 서비스 할 수 있는 부두가 정해져 있지 않고, 내부 순번에 따라 매암부두 또는 남화예선부두 정계지에 대기 중인 선박이 사용된다.

Fig. 3은 예선 정계지 별로 각 항만 그룹별 서비스 예선의 동선을 나타낸 것이다. 즉, 그룹1과 그룹3 부두는 매암부두 정계지의 예선이, 나머지 그룹의 부두는 남화예선부두 정계지 예선이 서비스 하는 것으로 설정하여 소요시간을 산정하였다.

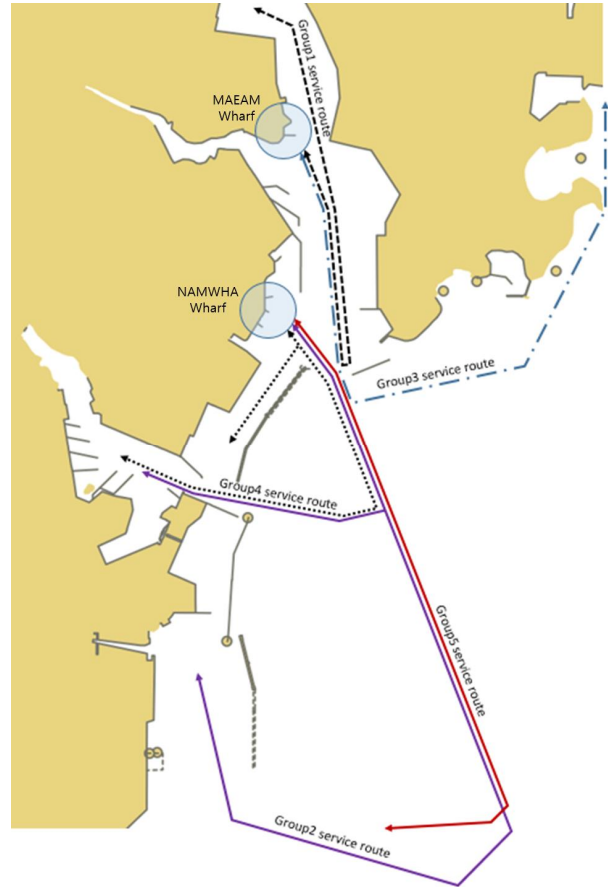


Fig. 3. Tugboat service root by port group of Ulsan port.

Table 9는 Fig. 3에서 정의한 방법에 따라 울산항 부두 그룹별로 예선 정계지에서 예선 서비스 제공 선박까지 이동할 때 소요된 시간, 예선 서비스 제공 시간, 그리고 예선 서비스 종료 후 예선 정계지로 이동할 때 소요된 시간을 나타내며, 이 결과를 시뮬레이션 입력변수로 활용하였다.

여기서 예선 서비스 제공 시간은 부두에서 선박 접·이안 작업에 소요되는 시간을 의미한다. 그리고 울산항 입·출항 선박의 AIS 자료 분석을 근거로 선박은 항내에서 평균 6노트의 속력으로 항해하며, 이 때 소요되는 예선 서비스 시간을 산정하였다.

Table 9. Ulsan port tugboat service time (units: hour)

Group	Items	Tugboat berth → ship	Tugboat service	Ship → tugboat berth	Total
Group1		0.4	1.6	0.2	2.2
Group2		1.0	1.5	0.6	3.1
Group3		0.5	1.3	0.6	2.4
Group4		0.4	1.4	0.4	2.2
Group5		1.1	2.4	0.7	4.2

6) 선박별 예선 사용기준 정의

울산항 예선사용기준은 앞에서 언급한 바와 같이 ‘울산항 예선운용세칙’을 준용해야 한다. 따라서 법적 기준에 근거하여 입·출항하는 선박은 필요한 예선을 할당할 수 있는 프로세스에 대한 정의가 이루어져야 정확한 시뮬레이션이 가능하다.

Table 10은 울산항 입항 선박의 톤수에 따라 할당되는 예선의 마력과 척수를 정의한 것이다. 즉, 선박 톤수에 따라 요구되는 예인선 마력에 대하여, 이를 만족시킬 수 있는 경우의 수를 모두 도출하였으며, 이를 시뮬레이션에 반영하였다. 이를 통해 상황에 따라 선박 입·출항에 필요한 예선 척수와 마력이 자동으로 할당될 수 있도록 프로세스를 정의하였다.

Table 10. Tugboat count and horse power assignment process

Tons(G/T)	Assigning tugboats class(horse power)
~5,000	1,000class(1) or 2,000class(1)
5,000 ~ 10,000	1,000class(2) or 2,000class(1)
10,000 ~ 20,000	2,000class(2) or (2,000class(1)&3,000class(1))
20,000 ~ 30,000	3,000class(2) or (2,000class(1)&3,000class(1))
30,000 ~ 50,000	4,000class(2) or (3,000class(1)&4,000class(1))
50,000 ~ 70,000	4,000class(2) or (4,000class(1)&5,000class(1)) or 5,000class(2)
	4,000class(3) or (4,000class(1)&6,000class(1)) or (4,000class(1)&5,000class(2)) or (4,000class(2)&5,000class(1)) or 5,000class(2) or (5,000class(1)&6,000class(1)) or 6,000class(2)
70,000 ~ 100,000	5,000class(3) or (5,000class(2)&6,000class(1)) or (5,000class(1)&6,000class(2)) or 6,000class(3)
100,000 ~	
90,000 ~ (SBM)	4,000class(3) or (4,000class(1)&6,000class(1)) or (4,000class(2)&5,000class(1)) or 5,000class(2) or (5,000class(1)&6,000class(1)) or 6,000class(2)
~90,000 (SBM)	

3.3 시뮬레이션 설계

1) 시뮬레이션 프로세스 설계

Fig. 4는 시뮬레이션 프로세스를 나타내며, 이는 선박의 입항, 예선 할당, 접안, 하역 작업 수행, 하역 작업 종료, 예선 할당, 그리고 출항 순서로 진행됨을 의미한다.

우선, 선박이 항만에 입항하면 접안 작업을 위해 필요한 예선 규모를 할당하고, 서비스 가능 예선 유무를 확인한다. 이때 가능 예선이 없으면 지정된 묘박지에 투묘하고, 예선 서비스가 가능할 때까지 대기한다. 필요 예선이 확보되면

선박은 입항하여 접안 작업을 마무리하고, 하역 작업을 시작한다. 이후 예선은 접안된 선박을 떠나 정계지에 입항한다. 단, SBM 작업 선박의 경우 입항부터 출항까지 계속해서 예선을 사용하는 것으로 설계하였다.

하역 작업을 완료한 선박은 선박 톤수를 고려하여 예선 서비스 가능 여부를 확인하고 가능할 경우 예선 서비스를 통해 이안 작업을 실시하며, 예선이 확보되지 않을 경우에는 부두에서 대기한다. 이후 예선이 가용 상태가 되면 정계지에서 출발한 예선의 도움을 받아 출항하며, 예선 서비스를 마친 예선은 다시 정계에 입항한다.

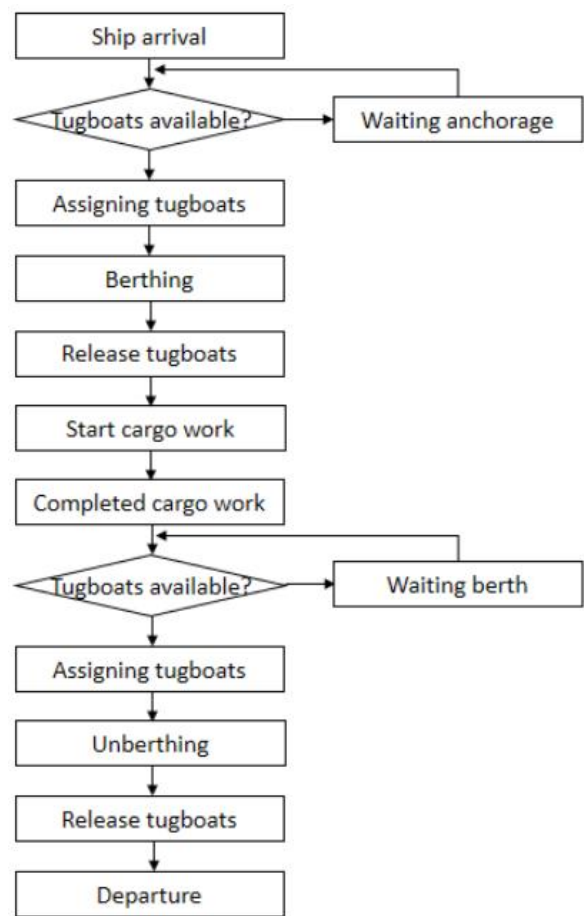


Fig. 4. Simulation process.

2) 시뮬레이션 모델 설계

Fig. 5는 항만 물류 분야에서 주로 사용하는 시뮬레이션 프로그램인 ARENA 소프트웨어를 이용해 시스템을 설계한 것이다. 우선, Create Module을 이용해 함수 분포에 따라 Entity(선박)를 생성하고, 해당 선박에 각종 변수를 할당하였으며, Decide Module을 이용해 정해진 비율에 따라 5가지 항만 그룹으로 분류하였다. 그리고 Table 11의 기준에 따라 접

## 시뮬레이션 기법을 활용한 울산항의 적정 예선 척수 분석

이안 선박이 요구하는 예선 마력을 결정한 후 ‘예선 서비스 → 하역 작업 → 예선 서비스 → 출항’ 프로세스를 서브 모델로 구현하였다.

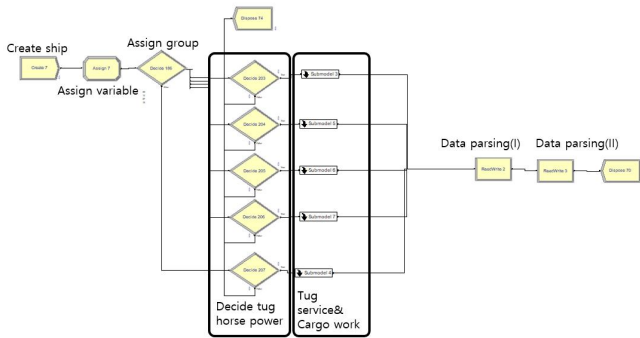


Fig. 5. Arena simulation model design.

### 3.4 시뮬레이션 수행 및 검증

본 연구에서 설계한 시뮬레이션 모델의 검증을 위해 2019년 울산항 이용 선박 및 예선 서비스 이용 선박 비율 자료를 입력하였다. 그리고 시뮬레이션 워밍업 시간은 30일, 시뮬레이션 수행기간은 365일, 그리고 프로세스 반복 횟수는 10회로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

Table 11은 시뮬레이션 수행 결과를 나타낸 것이다. 즉, 최대 동시 작업 예선 척수는 19척으로 현재 울산항에서 운용 중인 48척과는 많은 차이가 있는 것으로 나타났다. 또한 예선 마력별 평균 가동율은 1,000마력급이 25.7%로 가장 높고, 6,000마력급이 0.02%로 가장 낮은 것으로 나타났다.

Table 11. Simulation results

	Number of tugboats	Max. concurrent tugboats	Average operating rate by hp	Average operating rate	Average waiting ships
1,000 hp	14	19	25.7 %	11.8 %	0.0
2,000 hp	8		6.5 %		
3,000 hp	11		3.7 %		
4,000 hp	7		14.4 %		
5,000 hp	3		0.3 %		
6,000 hp	5		0.02 %		

Table 12는 모델링 검증 결과를 나타낸 것이다.

우선, 울산항 도착선박 척수에 대한 2019년 자료는 23,033척이며, 시뮬레이션 결과는 22,962척으로 실제 자료와 99.7%로 일치하는 것으로 나타났다. 또한 예선 서비스를 받은 선박 척수도 실제 자료와 110.4%로 일치하는 것으로 나타났다. 즉, 본 연구에서 설계한 시뮬레이션 모델은 실제의 현상

을 ±0.5% 범위 내로 반영하며, 결과적으로 시뮬레이션 모델의 타당성이 검증되었다고 볼 수 있다.

Table 12. Validation of Simulation model

	Actual (a)	Simulation (b)	Accuracy (b)÷(a)
Arrival ships	23,033	22,962	99.7%
Ships serviced by tugboats	6,477	6,501	100.4%

## 4. 시뮬레이션 수행 및 결과

### 4.1 울산항 예선 시나리오 설계

Table 13은 최적의 예선 척수 및 예선 마력 비율을 도출하기 위해 설계한 시나리오를 나타낸다.

우선, 현재 울산항 입항 선박 중 약 30% 정도의 선박만이 예선 서비스를 이용하고 있다. 그러나 예선 부족으로 인해 선박이 부두에 입항하지 못하고 대기하는 상황을 미연에 방지하고 선박의 안전한 접·이안을 달성하기 위해서는 모든 선박은 예선사용기준에 따라 예선을 사용한다는 전제하에 예선의 척수 및 마력을 적절하게 배치·운영할 필요가 있다.

따라서 시나리오 설계 시 모든 선박은 예선사용기준을 준수하여 예선 서비스를 이용하는 것으로 가정하였으며, 시뮬레이션 수행 후 대기 선박이 발생하지 않는 시나리오를 최적의 방안으로 선택하였다.

1번 시나리오는 현행 울산항 예선 비율과 척수로 구성되어 예선사용기준에 따라 선박에 예선 서비스를 제공할 경우 현재의 예선 척수 및 예선 마력 비율을 적정한지 확인하고자 설계하였다. 그리고 나머지 시나리오 2번~6번은 예선 척수와 예선 마력 비율을 서로 다르게 배치하여 가장 효율적인 방안을 확인하고자 설계하였다. 다만, 울산항은 초대형 VLCC선박의 입·출항 실적이 있는 점을 감안하여 5,000마력급과 6,000마력급 예선을 최소 2대씩 배치하여 설계하였다.

Table 13. Simulation scenario design

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6
1,000 hp	14	15	16	16	16	16
2,000 hp	8	9	10	10	10	10
3,000 hp	11	9	7	6	5	4
4,000 hp	7	7	7	7	7	7
5,000 hp	3	2	2	2	2	2
6,000 hp	5	2	2	2	2	2
Total	48	44	44	43	42	41

4.2 시나리오별 시뮬레이션 수행

Table 14는 시나리오에 따라 수행한 시뮬레이션 결과를 나타내며, 예선 마력별 평균 가동율, 예선 전체 평균 가동율, 그리고 평균 대기 선박 척수를 결과로 도출하였다.

시뮬레이션 워밍업 시간은 60일, 시뮬레이션 수행 기간은 365일, 그리고 프로세스 반복 횟수는 10회로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

Table 14. Scenario simulation results

Items	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6
1,000 hp	75.8	73.4	71.0	71.0	71.0	71.0
2,000 hp	43.8	36.0	30.1	30.0	30.9	30.5
Tugboat operating rate (%)						
3,000 hp	15.4	18.2	22.6	26.6	30.1	38.6
4,000 hp	31.6	31.5	31.5	31.5	31.5	31.5
5,000 hp	3.2	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
6,000 hp	0.3	1.6	1.5	1.6	1.6	1.6
Average operating rate (%)	28.4	27.5	26.8	27.5	28.2	29.6
Average waiting ships	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1

시나리오별 시뮬레이션 결과, 1,000마력급 예선의 가동율이 모든 시나리오에서 가장 높은 것으로 나타났다. 또한 상대적으로 입항 선박 척수가 적은 대형선이 접·이안할 때 필요한 고마력 예선의 경우 가동율이 낮은 것으로 나타났다. 예선의 평균 가동율은 약 27%~30% 수준이며, 예선 부족으로 인한 대기 선박의 척수는 시나리오 1번, 2번, 그리고 6번에서 시뮬레이션 기간(1년)동안 평균 0.1척인 것으로 나타났다.

Fig. 6은 시나리오별 시뮬레이션 결과 중 전체 예선 척수와 평균 대기 선박 척수와의 관계를 그래프로 나타낸 것이다.

우선, 현행 울산항 예선 척수 및 비율을 적용한 시나리오 1번은 예선 척수가 48척임에도 불구하고 평균 대기 선박 척수가 0.1척인 것으로 나타났다. 이는 수요가 집중되는 마력의 예선 척수는 상대적으로 적고, 그렇지 않은 마력의 예선이 많기 때문인 것으로 판단된다.

반면, 시나리오 3번, 4번, 5번은 전체 예선 척수는 다르나 평균 대기선박 척수는 모두 0.0척으로 도출되었다. 따라서 3가지의 시나리오 중 전체 예선 척수가 가장 적은 시나리오 5번이 예선 척수 및 예선 마력 비율이 울산항에 가장 적합한 것으로 도출되었다.

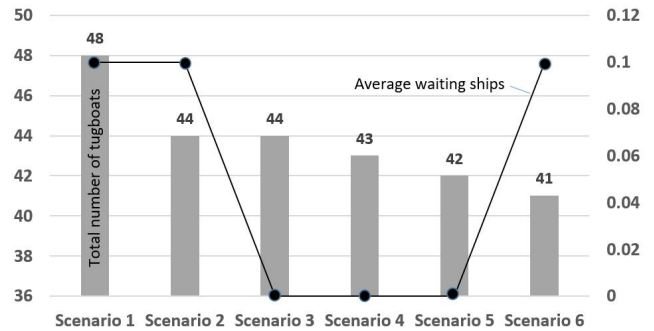


Fig. 6. Analysis scenario simulation results.

결론적으로 울산항의 예선 척수는 42척을 배치하고, 예선 마력 비율은 1,000마력급 16척, 2,000마력급 10척, 3,000마력급 5척, 4,000마력급 7척, 5,000마력급 2척, 그리고 6,000마력급 2척으로 조정할 경우 효과적인 예선 운영이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

선박의 안전한 접·이안을 담당하는 예선은 항만의 안전하고 효율적인 운영을 위한 여러 요소들 중 무엇보다 중요한 사항이라고 할 수 있다. 따라서 항만은 입·출항하는 선박의 규모 및 항만 특성에 따라 적절한 척수 및 규모의 예선을 보유할 필요가 있다. 그러나 항만의 특징에 따라 보유해야 하는 적정 예선 척수 및 규모에 대한 연구가 부족한 상황이고, 이로 인하여 항만 관리자, 예선 사용자, 그리고 예선 사업자 간 분쟁이 자주 발생하고 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 울산항을 중심으로 시뮬레이션 기법을 사용하여 예선의 적정 척수 및 예선 마력 비율을 제시하였으며, 연구 내용을 정리하면 다음과 같다.

먼저, 시뮬레이션 구축을 위한 첫 번째 과정으로 항만 입·출항 및 예선 운영 시스템을 설계하였다. 다음으로, 시스템 설계 시 정의한 입력 변수는 울산항의 2019년 선박 입·출항 데이터를 조사하여 도출하였으며, ARENA 시뮬레이션 소프트웨어에 입력 가능한 형태로 표준화하였다. 그리고 선박의 입·출항 프로세스와 예선 서비스 프로세스를 결합한 시뮬레이션 프로세스를 설계하고, 이를 ARENA 시뮬레이션 소프트웨어 모델로 구현하였다. 마지막으로 6가지의 시나리오에 대한 시뮬레이션 수행 결과, 대기 선박이 발생하지 않는 시나리오 5번(예선척수 42척)을 최적의 안으로 도출하였다.

본 연구의 학술적 가치와 독창성은 다음과 같다. 첫 번째는 항만의 입·출항 선박과 예선 운영 프로세스를 시뮬레이션으로 구현하여 예선의 척수 및 예선 마력 비율 도출 방법



론을 제시했다는 점이다. 두 번째는 기존 연구의 한계점이었던 항만 입항 시간의 불규칙성을 모델링으로 구현하고, 대기 선박이 발생하지 않는 수준에서의 예선 척수 및 마력 비율을 제시하여 입항 선박의 불규칙성에 대응할 수 있는 예선 척수를 제시하였다는 점이다.

이 연구 결과는 법령에 근거하여 예선 수급 계획을 수립할 때 예선 규모 결정을 위한 정량적인 자료로 활용할 수 있다고 판단된다.

향후에는 부두별로 선박 입·출항 및 예선 서비스 프로세스를 설계하여 결과에 대한 신뢰도 향상 및 결과 구체화를 위한 추가적인 연구가 필요하다. 또한 본 연구에서 제시한 결과가 예선 사용료 측면에서도 가장 효과적인 방안인지에 대한 추가적인 연구도 필요하다.

---

Received : 2020. 06. 26.

Revised : 2020. 08. 12.

Accepted : 2020. 08. 28.

## References

- [1] Bondarenko, O., V. Nekrasov, and O. Yastreba(2018), Effectiveness and Optimization of Harbour Tug Fleet, *Transport and Telecommunication*, Vol. 19, No. 2, pp. 140-150.
- [2] IUSM(2015), A New Companies Starts a Tug Business Even Though Ulsan Port is overqualified, Retrieved from <http://iusm.co.kr/news/>, on January 14.
- [3] Jeong, J. Y.(2016), A Study of Tugboat Operation Strategies in Accordance with Opening the Incheon Newport-Based on Arena Simulation, Master's Thesis, Graduated School of Logistics, Inha University.
- [4] KTC(2015), A Study on the Improvement of Tug System and Promotion Plan of Tug Industry, Korea Tugbusiness Corporation Report, Vol. 244, pp. 117-124.
- [5] KTC(2018), A Study on the Optimal Number of Tug Boat Supply Planning, Korea Tugbusiness Corporation Report, Vol. 342, pp. 254-297.
- [6] KTC(2019), Status of Tug Boat in Each Harbour, Korea Tugbusiness Corporation, <http://www.e-tug.org/>, on January 3.
- [7] MOF(2019), Announcement of Tugboat Supply Plan, Retrieved from <http://www.mof.go.kr/>, on August 11.
- [8] MOF(2020), Harbour Facilities in Ulsan Port, Retrieved from <http://ulsan.mof.go.kr/>, on January 14.
- [9] Shahpanah, A., A. Hashemi, G. Nouredin, S. M. Zahraee, and S. A. Helmi(2014), Reduction of Ship Waiting Time at Port Container Terminal Through Enhancement of the Tug/Pilot Machine Operation, Vol. 68, No. 3, pp. 63-66.