

論 文

항계내 항로의 해상교통 혼잡도 평가에 관하여
- 울산 신항만의 혼잡도 평가를 기준으로 -

구 자 윤*

Evaluation of Traffic Congestion in Channels within Harbour Limit
- On Channels in Ulsan New Port Development -

J. Y. Koo

Key Words : 교통혼잡도(Traffic congestion), 대기행렬이론(Queueing Theory), 지수분포(Exponential distribution), SLAM 시뮬레이션 언어(Simulation Language for Alternative Modelling), 통항우선권(Transit Priority), 평균대기선박수(Average Length), 평균대기시간(Average Waite Time)

Abstract

Whether over taking or parallel sailing of two or more vessels is allowable on marine traffic route or not, the traffic congestion due to traffic volume has to be evaluated separately.

In Gaduk-sudo, overtaking or parallel sailing is so allowable that the Bumper Model is introduced to evaluate the traffic congestion. But the channels within the harbour limit such as the route of Ulsan New Port are so prohibited overtaking or parallel sailing that the traffic congestion has to be evaluated by using theoretical traffic capacity or by traffic simulation.

In this paper, the congestion of Southern New Port and Mipo Port was evaluated the congestion by using theoretical traffic capacity and the other area of Ulsan Port by traffic simulation.

The increased traffic volumes on Ulsan Channels according to Ulsan New Port Development in 2011 were evaluated to have no effect with the traffic congestion.

* 정회원, 한국해기연수원 교수

1. 서 론

신항만 개발에 따른 목표선석까지의 항로 설계에 있어서 개항질서법의 적용을 받는 항계내의 항로와 해상교통안전법에 근거한 특정해역의 항로지정방식에 의한 항로 및 좁은 수로 등에서의 항로로 각기 구분 평가되어야 한다.

가장 우선적인 비교는 개항질서법에 의한 항로에서는 병행 항행의 금지와 타선박의 추월 금지를 원칙으로 하고 있기에 각 선박은 입출항 순서에 의한 단선항행이 시행되는 반면에, 해상교통안전법에 근거한 각 항로들은 특별한 지형적인 제약에 의해 따로 규정되지 않는 한 항로폭이 허용하는 범위내에서의 병행 및 추월이 가능하다.

항로 시스템의 능력 즉, 교통용량에 따른 혼잡도를 평가하는데는 선박이 차지하는 수면의 넓이가 기본이 되며, 이를 구하는데 해상교통의 실태를 관측 조사하는 방법과 조선역학적인 해석에 의한 방법이 있다. 그리고 이 결과를 이용하여 교통용량을 구하는데 이론적인 방법과 시뮬레이션에 의한 방법이 사용된다.

교통용량에 의한 방법은 해상교통안전법에 근거한 항로들과 같이 단선이 아닌 좁은 수로 등의 항로에서 Bumper 모델^{1,2)}을 이용하여 기본 교통용량을 구하고, 통항량이 가장 폭주한 항로의 하나인 일본 浦賀水道の 혼잡도 수준과 상대 평가함으로써 실용 교통용량의 수준을 정할 수 있으며, 부산 가덕 신항만 개발에 따른 가덕수도의 혼잡도 평가가 그 예로 들 수 있다.^{3,4)}

개항질서법에 근거한 항로와 같이 단선항행시 교통용량에 의한 혼잡도 평가는 항계내 항로의 형태에 따라 직선부나 진입부에 있어서는 대기행렬이론(Queueing Theory)을 직접 적용시킬 수 있으며, 교차부가 존재하여 항법의 적용이 필요하거나, 야간통항 제한같은 특성의 입출항규칙이 존재할 경우에는 각 제한조건의 모델을 구성하여 항로 혼잡도에 대하여 일정기간 시뮬레이션 평가할 수 있다.

따라서, 본 연구는 항계내 항로의 혼잡도 평가기법 개발과 그 적용을 목적으로 울산 신항만 개발에

따른 울산항내 항로 혼잡도를 평가한다.

울산항로는 항계내 존재하므로 그 혼잡도는 대기행렬이론과 선박항행 시뮬레이션기법을 이용하여 평가하는데, 울산항중 신항만 남측과 미포항같이 직선부(진입부)에 대해서는 대기행렬이론을 사용하며, 대기행렬이론이 불가능한 울산항의 제1항로에 있어서는 항로의 분기점(부두별 이접안을 위하여 선박이 항로상에서 교차하는 점)에 대하여는 선박항행 시뮬레이션기법을 사용한다.

2. 울산 신항만의 2006, 2011년 해상교통량 추정

2.1 해상 교통량 추정방안

2006년 및 2011년의 울산항 교통량을 추정하기 위하여 Fig. 1과 같은 추정절차를 따른다.

- 1) 신항만개발 투자우선순위 평가 최종보고서(해운항만청, 1996.7)5)에 근거하여 2006년 및 2011년의 울산항 품목별 항만 물동량을 추정하고, 이를 기능재배치후 하역능력 물동량, 기능재배치후 계획하거나 신축중인 부두의 소요 물동량 및 신항만 소요 물동량6)으로 각 구분 추정한다.
- 2) 1996년의 울산항 각 부두별 입항 교통량을 조사하여, 이를 기능재배치시 하역 능력에 따른 기존 입항 교통량으로 처리한다. 이 때, 교통량에 따른 처리 화물량을 조사하여 품목별 적당 처리화물량과 평균 톤수를 추정한다.
- 3) 과거 1979년부터 1996년까지 적당 처리화물량과 평균 톤수의 변화량을 조사하여 2006년 및 2011년의 품목별 적당 처리화물량과 평균 톤수를 추정한다. 이를 근거로, 1996년 이후 계획 및 신축중인 부두의 소요 물동량에 대하여 품목별 적당 처리화물량으로 2006년과 2011년의 부두별 입항 교통량을 추정한다.
- 4) 울산항 총 소요 물동량중 부족분에 대하여 추진된 울산 신항만 건설의 소요 물동량을 근거로 품목별 적당 처리화물량에 따른 2006년 및 2011년 울산신항 신규 입항 교통량을 추정한다.

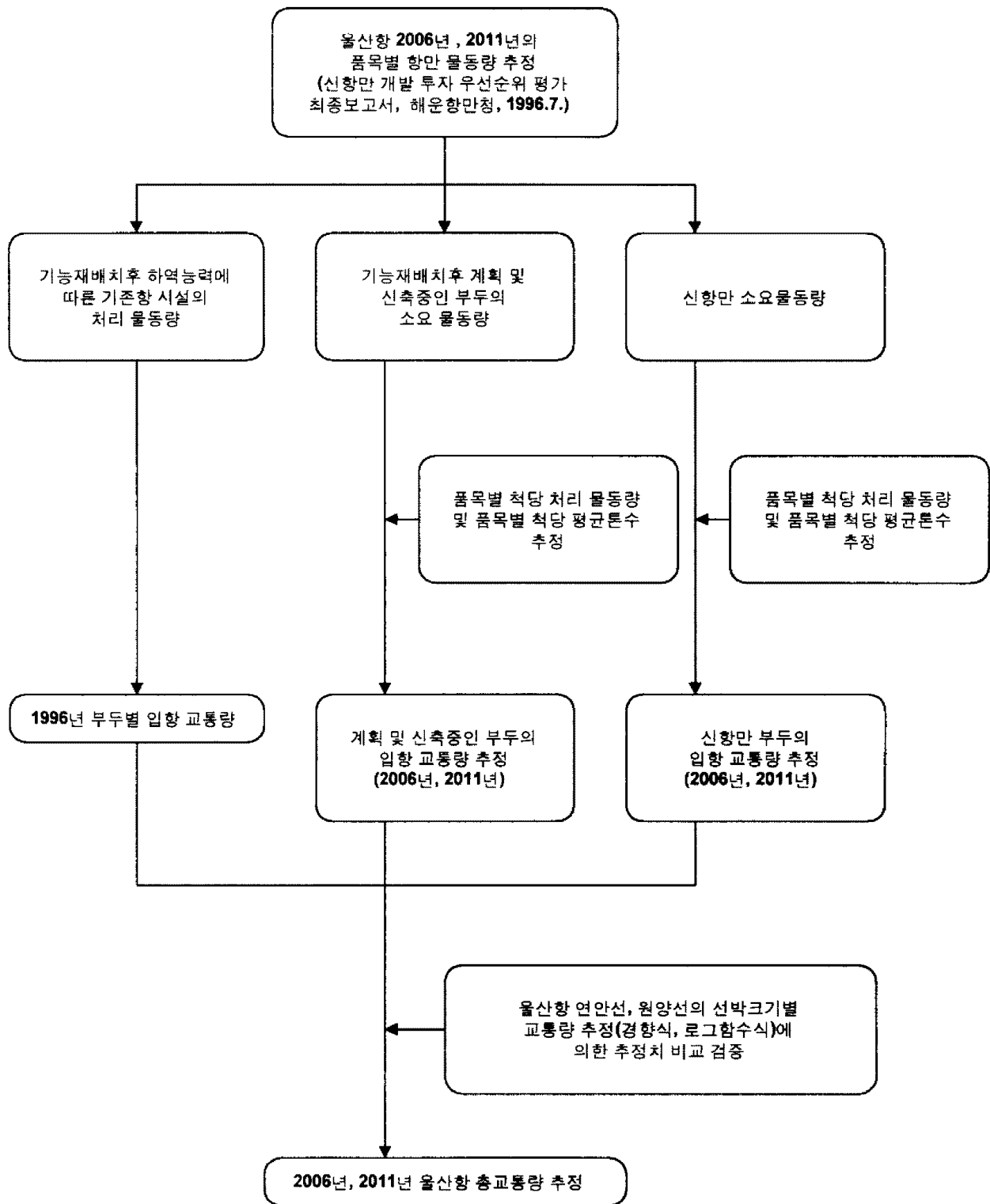


Fig. 1 Flow Chart to estimate the Ulsan's Traffic Volumes (2006, 2011)

- 5) 상기 2), 3), 4)의 양을 합하여 2006년 및 2011년의 울산항 총 입항 교통량 추정치로 한다.
- 6) 울산항의 과거 1979년부터 1995년까지의 입항 교통량의 증가추세를 조사하여 상기 5)의 입항 교통량 추정치와 비교 검증한다.
- 7) 2006년 및 2011년 울산항 총 입항 교통량 추정치를 항로별로 산정하여 항로별 혼잡도를 분석한다.

2.2 울산항 2006년 및 2011년 교통량 추정결과

1996년 교통량 실적을 기준으로 기능재배치후 하역능력에 따른 기존 울산항 교통량, 2006년과 2011년에 대한 계획 및 공사중인 부두의 교통량 및 울산 신항만 신설부두의 교통량을 모두 합산하면 2006년 및 2011년에 대한 울산항의 총 교통량 추정치를 구할 수 있고, 이는 Table 1과 같다.

Table 1 Estimated Traffic Volumes in Ulsan Port (2006, 2011)

영역별	시기별	2006년		2011년	
		입항척수 (척)	척당평균톤수 (천G/T)	입항척수 (척)	척당 평균톤수 (천G/T)
울산본항	1996년 실적	5,312	7.0	5,312	7.0
	계획 및 공사중	948	10.1	805	10.2
	소 계	6,260	7.5	6,117	7.4
장생포항	1996년 실적	4,875	1.7	4,875	1.7
	계획 및 공사중	42	9.9	63	12.4
	소 계	4,917	1.8	4,938	1.8
울산묘박지 등	1996년 실적	3,443	4.4	3,443	4.4
유공부두	1996년 실적	1,095	13.0	1,095	13.0
	계획 및 공사중	709	9.9	1,072	12.4
	소 계	1,804	11.8	2,167	12.7
화암부두	1996년 실적	759	2.8	759	2.8
유공부이	1996년 실적	148	113.3	148	113.3
은산항	1996년 실적	3,645	3.9	3,645	3.9
	계획 및 공사중	2,194	7.2	2,483	9.8
	신항만(북측)	6,460	8.3	5,613	10.4
	소 계	12,299	6.8	11,741	8.3
은산묘박지 등	1996년 실적	933	18.1	933	18.1
	계획 및 공사중	70	137.0	67	143.9
	소 계	1,003	26.4	1,000	26.5
신항만(남측)	신항만(남측)	-	-	1,589	9.6
미포항	1996년 실적	821	1.7	821	1.7
총 계	1996년 실적	21,031	6.0	21,031	6.0
	계획 및 공사중	3,963	10.7	4,490	12.6
	신항만	6,460	8.3	7,202	9.6
	총 계	31,454	7.1	32,723	7.8

Table 2 Estimated Traffic Volumes by Trend Analysis in 1979~1995

선박 크기		울산항 교통량 (입항 기준)			
		연안선	원양선	소계	비율(%)
2001	100 G/T 미만	192	0	192	0.7
	100 ~ 500 G/T	5,515	329	5,844	22.5
	500 ~ 3,000 G/T	10,011	2,787	12,798	49.3
	3,000 ~ 5,000 G/T	740	1,426	2,166	8.4
	5,000 ~ 7,000 G/T	517	411	928	3.6
	7,000 ~ 10,000 G/T	173	292	465	1.8
	10,000 ~ 20,000 G/T	260	960	1,220	4.7
	20,000 G/T 이상	54	2,285	2,339	9.0
	총계	17,462	8,490	25,952	-
2006	100 G/T 미만	131	0	131	0.5
	100 ~ 500 G/T	5,953	356	6,309	21.7
	500 ~ 3,000 G/T	11,376	3,046	14,422	49.7
	3,000 ~ 5,000 G/T	834	1,644	2,478	8.5
	5,000 ~ 7,000 G/T	597	474	1,071	3.7
	7,000 ~ 10,000 G/T	197	326	523	1.8
	10,000 ~ 20,000 G/T	306	1,078	1,384	4.8
	20,000 G/T 이상	62	2,640	2,702	9.3
	총계	19,456	9,564	29,020	-
2011	100 G/T 미만	78	0	78	0.2
	100 ~ 500 G/T	6,359	386	6,745	21.3
	500 ~ 3,000 G/T	12,561	3,260	15,821	49.9
	3,000 ~ 5,000 G/T	916	1,828	2,744	8.7
	5,000 ~ 7,000 G/T	663	528	1,191	3.8
	7,000 ~ 10,000 G/T	219	359	578	1.8
	10,000 ~ 20,000 G/T	347	1,188	1,535	4.8
	20,000 G/T 이상	69	2,949	3,018	9.5
	총계	21,212	10,498	31,710	-

2.3 과거 실적에 따른 울산항 교통량 추정치와의 비교 검토

1) 과거 실적에 따른 울산항 교통량 추정치

연안선과 원양선의 교통량 추정치는 울산항의 연안선과 원양선에 대한 1979년 ~ 1995년 사이의 선박 크기별 교통량 실적을 경향식에 의한 추정과 로그함수에 의한 추정 결과를 평균하여 추정하였

고, 이들 연안선과 원양선 추정치를 합산한 결과는 Table 2와 같으며, 이는 1979 ~ 1985년 사이의 교통량 실적에 따른 울산항의 총 교통량의 추정치에 해당한다.

2) 추정치의 비교와 채택 추정치

Table 1에서 구한 물동량에 근거한 교통량 추정

치를 Table 2에서 구한 교통량 과거 실적에 근거한 교통량 추정치와 비교한 결과 2011년 기준으로 물동량 기준 교통량 추정치가 32,723척, 교통량 과거실적 기준 교통량 추정치가 31,710척으로 물동량 기준 교통량 추정치의 약 96.9% 수준이다. 본 연구에서는 추정 교통량의 혼잡도를 평가할 목적이므로 물동량에 근거한 교통량 추정치를 울산항 교통량 추정치로 채택하여 혼잡도를 평가하고자 한다.

Table 3 Accepted Estimation of Traffic Volumes in Ulsan Port

(unit: fleets)

구	분	2006년	2011년
물동량에 근거한 교통량 추정치(채택치)		31,454	32,723
과거실적에 근거한 교통량 추정치(채택치 대비 백분율)		29,020 (92.3%)	31,710 (96.9%)

3. 대기행렬이론을 이용한 항로 혼잡도 평가

3.1 대기행렬이론의 이용

선박의 항로 이용과정을 분석하여 보면 선박이 항로를 이용하기 위하여 선행선박과의 간격이 충분하지 않을 경우 대기하여 선행선박이 안전거리 이상을 진행하였을 때 진입하는 형태로 이는 대기행렬이론에서의 형태와 같다. 즉, 선박이 항로에 진입하여 일정거리를 진행하는 동안에 마치 선행 사용자가 어떤 시설을 이용하는 동안은 다른 사용자가 시설을 이용할 수 없는 것처럼 다른 선박이 항로에 진입할 수 없다. 즉, 선행선박이 안전거리를 이동하는 시간을 대기행렬이론에서의 서비스 시간으로 보고 항로의 입구부분을 서버(Server)로 해석하면 된다. 따라서, 선박의 항로 이용에 있어서의 대기시간의 분석을 대기행렬이론을 이용하여 산정할 수 있다.

즉, 항로의 최대 항행통항량을 선박의 최소 이격거리(정지거리)를 고려하여 구하고, 선박의 도착패턴을 Poisson 분포로 보아 평균과 분산(표준편차의 제곱)이 같다는 결과에서 평상시의 입항가능

척수를 분석할 수 있다.

3.2 모델의 설계

항로에 있어서 대기행렬모델은 M/G/1 queue model로 볼 수 있다. 즉, 도착분포는 지수분포(Exponential Distribution)이며, 서비스 시간의 분포는 일반분포이며, 서버(Server)는 하나인 형태이다.

대기행렬이론의 결과에 의하여 M/G/1 queue의 경우 평균대기시간 W_q 는 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$W_q = \frac{\rho^2 + \lambda^2 \sigma_s^2}{2\lambda(1-\rho)} = \frac{\lambda[(1/\mu)^2 + \sigma_s^2]}{2(1-\rho)} \dots\dots\dots (1)$$

- W_q : 평균대기시간
- ρ : 이용률 (= λ/μ)
- λ : 도착률 (arrival rate)
- μ : 출발률 (departure rate)
- σ_s : 서비스시간의 표준편차

또한, Little's formula에 의하여 평균대기선박의 수 L_q 는

$$L_q = \lambda W_q \dots\dots\dots (2)$$

로 구할 수 있으며, 시스템의 최대 도착률 λ_{max} 는 도착률이 출발률과 같을 때 얻어지므로,

$$\lambda_{max} = \frac{\mu}{1/E[S]} \dots\dots\dots (3)$$

- λ_{max} : 최대도착률
- $E[S]$: 평균서비스시간

로 산정할 수 있다. 그러나 이 경우에는 시간이 흐를수록 대기선박의 수가 많아져 평균대기시간이 무한대가 된다.

선박의 도착시간간격의 분포가 지수분포인 수로에서의 평균대기시간 W_q 는 다음과 같다.7)

$$W_q = \frac{[(A^2+1)E[L^2]+2A(E[L])^2]/V^2}{2[1/\lambda-(\lambda+1)E[L]/V]} \dots\dots\dots (4)$$

$$\begin{aligned}
 W_q &= \text{대기시간(min)} \\
 \lambda &= \text{분당 도착선박수(척/min)} \\
 V &= \text{선박속도(m/min)} \\
 A &= 0.168V^{.75} + 1.8 \\
 E[L] &= \text{선박길이의 평균} \\
 &= \sum P_i L_i \\
 E[L^2] &= \text{선박길이의 2차모멘트} \\
 &= \sum P_i L_i^2
 \end{aligned}$$

또한 항로의 최대능력 즉, 최대 선박도착률 λ_{max} 는

$$\begin{aligned}
 \lambda_{max} &= \frac{V}{(.168V^{.75} + 2.8)E[L]} \dots\dots\dots (5) \\
 &= \frac{V}{(A+1)E[L]}
 \end{aligned}$$

로 표현된다.

3.3 항로 진입부에 대한 혼잡도 평가결과

울산항의 2011년 교통량 추정치인 Table 1을 정

리하여 선박길이 및 선박길이의 2차모멘트(선박길이
 세공의 가중평균)를 구하면 Table 4와 같다.

울산항 제1항로의 평균 진입속도는 선박조종 시
 물레이션 결과 약 9Kts로 추정되고, 신항만 남측항
 로와 미포항은 각각 5Kts로 추정되었다. 따라서 각
 변수의 값을 구하여 (4)에 대입하면 평균대기시간
 은 Table 5와 같다.

결국, 신항만 남측 및 미포항과 같은 단일 직선
 항로 진입부에 대하여 대기행렬모델에 의한 평균
 대기시간 평가 결과는 다음과 같다.

- 1) 신항만 남측의 진입부에서 평균대기시간은
 약 0.79분, 대기선박수는 0.002척으로 거의 대
 기선박이 없어 혼잡도가 일어나지 않는다고 평
 가된다.
- 2) 미포항의 진입부에서 평균대기시간은 약 0.01
 분, 대기선박수는 0.00001척으로 거의 대기선
 박이 없어 혼잡도가 일어나지 않는다고 평

Table 4 Estimated Entrance Traffic Volumes in 2011

영역별	입항척수 (척)	비율 (r)	선박크기 (천G/T)	선박길이 (m)	가중선박길이 (rL)	가중선박길이 제곱(rL ²)	
울산본항	울산본항	6,117	0.1869	7.4	130	24.30	3,158.61
	장생포항	4,938	0.1509	1.8	70	10.56	739.41
	울산묘박지등	3,443	0.1052	4.4	100	10.52	1,052.00
	유공부두	2,167	0.0662	12.7	150	9.93	1,489.50
	화암부두	759	0.0232	2.8	70	1.62	113.68
	유공부이	148	0.0045	113.3	290	1.31	378.45
	온산항	11,741	0.3588	8.3	130	46.64	6,063.72
	온산묘박지등	1,000	0.0306	26.5	200	6.12	1,224.00
소계	30,313	0.9263	-	-	111.00	14,219.37	
신항만남측	1,589	0.0486	9.6	130	6.32	821.34	
미포항	821	0.0251	1.7	87	1.76	122.99	
합계	32,723	1.0000	-	-	119.08	15,163.70	

- (주) 1. 선박길이의 제원은 “항만시설물 설계기준서(해양수산부, 1993.12, PP. 12~16)”에 근거함.
 2. 가중선박길이의 합이 평균길이(E[L]), 가중선박길이제곱의 합이 길이의 2차모멘트(E[L²])이다.

Table 5 The Calculation of Average Wait Time

영역별	V (m/min)	λ(척/min)	A	E[L]	E[L ²]	평균대기시간(W _q)
울산본항	277.80	0.05767	13.23164	111.00	14,219.37	1.08372
신항만남측	154.33	0.00302	9.15600	6.32	821.34	0.78769
미포항	154.33	0.00156	9.15600	1.76	122.99	0.00941

가된다.

이상의 분석은 주야간 입출항이 모두 가능한 가정조건에서이며, 항로의 진입부 혹은 직선부에 한정된 것이므로, 선종에 따른 야간 도선제한의 경우에서 항로의 각 교차부의 혼잡도는 다음 장의 컴퓨터 모델링에 의한 시뮬레이션 기법을 이용한다.

4. 시뮬레이션을 이용한 항로 혼잡도 평가

4.1 시뮬레이션 기법의 이용

항로의 혼잡도를 추정하는데 이용된 대기행렬이론은 선박의 도착을 무작위적으로 해석하여 평균 대기시간을 구하는 점에 있어서는 기존의 방법보다 앞선 것이지만 전체 상황을 이상화하여 대기시간을 구하였고 또한 항로의 교차부에 대한 해석은 매우 어렵다. 이에 대한 해결방법으로 컴퓨터를 이용하여 항로의 상황을 수치모델화하고 선박의 도착을 발생시켜서 각 지점에서의 대기시간을 구하는 방법인 시뮬레이션 기법이 있다.

본 연구에서는 시뮬레이션 언어인 SLAM (Simulation Language for Alternative Modelling)을 이용하여 선박의 수로이용 형태를 모델화하였다.

4.2 모델의 설계

1) 가정 조건

울산항의 각 항로는 개항질서법에 의하여 단선항로로 이용되며, 다음의 가정 아래에서 모델을 설계하였다.

- (1) 선박의 각 항로 도착은 포와송 형태(Poisson Manner)를 따른다. 즉, 각 항로별 입항선박의 도착시간은 지수분포(Exponential Distribution)에 따른다.
- (2) 항로에 도착한 선박은 선행선박과의 거리가 충분할 때 항로에 진입할 수 있다. 최소한 선박간의 이격거리는 선박 길이와 선속에 따른 최소이격거리에 따르며, 이 최소이격거리는 PIANC(Permanent International Association of Navigational Congress)가 제안한 선박정지

거리에 관한 경험식에서 수로내의 제한조건 즉, 천수와 항로유지의 여유분 50% 및 충돌방지를 위한 여유분 20%를 고려한 다음 식을 이용한다.

$$d = D \times 1.5 \times 1.2$$

$$= (2.2 \times V^{0.75} + 1.8) \times L \dots\dots\dots (6)$$

단, d = 최소 이격거리(m)
 D = 선박의 정지거리(m)
 V = 선박 속도(Knot)
 L = 선박 길이(m)

- (3) 항로의 진입순서는 먼저 도착한 선박이 먼저 진입한다(First Come First Served Queue Siscipline).
- (4) 울산항의 야간도선 실태는 Table 6과 같고, 이에 근거한 부두별 항로의 진출입 제한을 Table 7과 같이 단순화한다.
- (5) 항로내에서 모든 선박이 일정한 속도로 항행한다. 단, 항로내의 각 구간에 대한 평균 속도는 해당 구간별로 따로 정한다.
- (6) 선박이 항로내의 교차점을 진행할 때 안전상 일정시간동안 다른선박이 진입할 수 없다. 선박의 항로 교차점 통과시간은 일반적으로 2~3분정도 걸리나 안전성을 고려하여 본 모델에서는 4분으로 가정한다.
- (7) 항로의 교차점에서 선박이 조우하게 될 때 선박의 항행규칙에 따른 우선순위에 따라 교차점을 통과한다. 개항질서법에 의거하여 항로 진출입 선박과 항로를 통항하는 선박 사이에는 항로 진출입 선박이 피항할 의무를 가지며, 주항로인 제1항로의 출항선과 제2항로 혹은 제3항로에서의 출항선 사이에 조우관계는 제2항로 혹은 제3항로 출항선이 피항 의무를 가진다. 또한 제1항로를 출항하는 선박과 제2항로나 제3항로에 입항하는 선박의 경우는 제1항로의 출항선이 우선하며, 제2항로나 제3항로의 입항선이 피항 의무를 가진다. 그외 제1항로 주변의 표박지나 선석으로 입항 또는 출항하는 선박과 제1항로상을 이용하여 입항 또는 출항중인 선박은 제1항로를 입항 또는 출항중인 선박이 우선한다.

- (8) 항로의 교차점이나 항로의 기종점에는 선박의 대기에 필요한 충분한 수역을 가진다. 위치를 유지할 수 있고, 정선후 다시 그 영역내 항행속도로 항해하기까지의 지체시간은 무시한다.
- (9) 선박이 항로내에서 정선할 때에는 그 정선은 무시한다.

Table 6 Allowable Pilot Limit at Night Time in Ulsan Port (1996. 7. 8. 현재)

구분	장소	야간도선실태
접안가능	본항 일반부두 수리조선소	○ 총톤수 2만톤, 흘수 9m 이하 화물선
	양곡부두	○ 총톤수 2만톤, 흘수 10m 이하 화물선
출항가능	본항 화암부두 수리조선소	○ 모든 선박 (단, 위험물 적재선은 총톤수 1만톤 이하)
	가스부두	○ 모든 선박
	양곡부두	○ 모든 선박
	용잠 1~3부두 유공 1~3부두	○ 모든 선박 (단, 용잠부두는 1만톤 이하)
	자동차부두 원유부이	○ 모든 선박 출항 가능
	온산항	○ 위험물 적재선은 1만톤 이하, 화물선은 2만톤, 흘수 9m 이하

Table 7 Allowable Pilot Limit at Night Time per Pier

영역별	부두별	야간	
		입항	출항
울산본항	석탄부두, 1~7부두, 일반부두	○	○
	자동차부두, 염포부두	×	○
장생포항	양곡부두, 동양부두, 현대정공돌핀, 장생포부두	○	○
	용잠부두, 유공2부두, 유공1부두	×	○
울산묘박지 등	M박지, 검역박지, 기타	○	○
유공부두	3~8부두, 가스부두	×	○
화암부두	화암부두	○	○
유공부이	유공부이(I, II)	×	○
온산항	온산 1~4부두, 정일부두, 쌍용정유돌핀, 쌍용돌핀, 대한유화부두, 기타 액체화물 계획부두	×	○
	잡화 계획부두, 신항만 북측지역부두	○	○
온산묘박지 등	쌍용부이, 유공부이(III)	×	○
신항만(남측)	신항만 남측지역부두	○	○
미포항	미포부두	×	○

(주) ○ : 입항 혹은 출항 가능
 × : 입항 혹은 출항 제한

- (10) 항만에서의 선박의 부족으로 인한 대기는 고려하지 않는다.
- (11) 예인선, 도선사의 숫자는 충분하여 이들을 기다리는 시간의 지체는 없다.
- (12) 항내 소형선(300G/T 이하)은 고려대상에서 제외하였으며, 전 선박의 항로내의 운항에 대해서는 완전한 통제가 이루어진다.

이상과 같은 가정아래 본 연구의 시뮬레이션 모델을 작성하였으나, 위의 가정은 필요시에는 조건의 경감이 가능하다. 즉, 항로의 통항시간대의 제

한이나, 항로 진입에 있어서 특정선박에 대한 우선권의 부여, 선박별 항로 통항속도의 변화, 최대 대기선박수의 제한도 가능하나, 여기서는 해당 사항이 아니므로 검토를 제외하였다.

2) 항로 혼잡도 평가 모델

(1) 항로의 모형

울산본항 항로상에서의 선박 운항은 Fig. 2와 같은 형태로 나타낼 수 있다. 이 때 8개로 구분한 각 부두에 선박이 접안하기 위해서는 14개의 교차점이 발생하는 것을 알 수 있다.

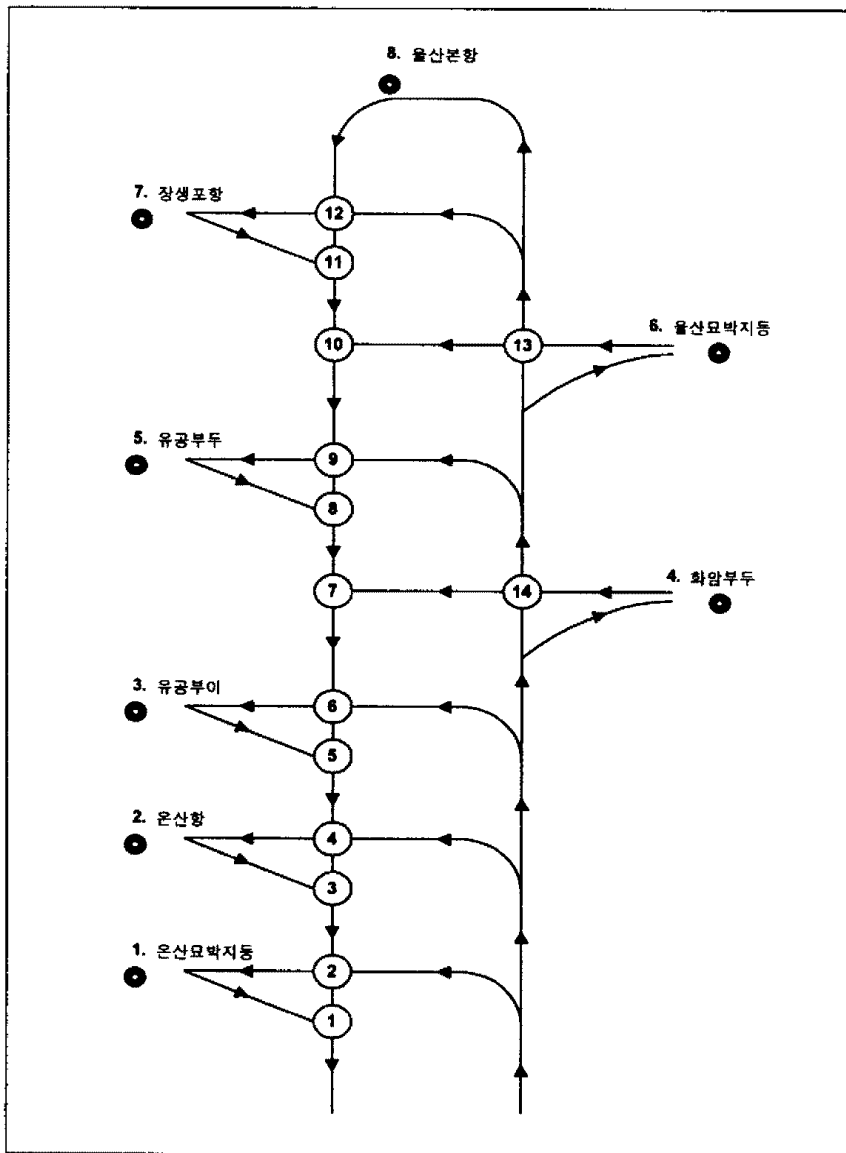


Fig. 2 Location of Piers and Number of Crossing Point

14개 교차점에서의 선박 통행 우선순위는 개항
실서법에 의거하여 Table 8과 같이 설계한다.

항로 혼잡도 평가 시뮬레이션 모델의 흐름도는 전
체적으로 Fig. 3(a) 및 Fig. 3(b)에 나타내고 있다.

(2) 모델의 흐름도

Table 8 Transit Priority at Each Crossing Point

교차부위 번호	선박진입방향	통행 우선권
1	<ul style="list-style-type: none"> • 울산 묘박지 등 → 제1출항항로 • 제1출항항로 	제 1 출 항 항 로
2	<ul style="list-style-type: none"> • 제1입항항로 → 울산 묘박지 등 • 제1출항항로 	제 1 출 항 항 로
3	<ul style="list-style-type: none"> • 울산항 → 제1출항항로 • 제1출항항로 	제 1 출 항 항 로
4	<ul style="list-style-type: none"> • 제1입항항로 → 울산항 • 제1출항항로 	제 1 출 항 항 로
5	<ul style="list-style-type: none"> • 유공부이 → 제1출항항로 • 제1출항항로 	제 1 출 항 항 로
6	<ul style="list-style-type: none"> • 제1입항항로 → 유공부이 • 제1출항항로 	제 1 출 항 항 로
7	<ul style="list-style-type: none"> • 화암부두 → 제1출항항로 • 제1출항항로 	제 1 출 항 항 로
8	<ul style="list-style-type: none"> • 유공부두 → 제1출항항로 • 제1출항항로 	제 1 출 항 항 로
9	<ul style="list-style-type: none"> • 제1입항항로 → 유공부두 • 제1출항항로 	제 1 출 항 항 로
10	<ul style="list-style-type: none"> • 울산 묘박지 등 → 제1출항항로 • 제1출항항로 	제 1 출 항 항 로
11	<ul style="list-style-type: none"> • 장생포항 → 제1출항항로 • 제1출항항로 	제 1 출 항 항 로
12	<ul style="list-style-type: none"> • 제1입항항로 → 장생포항 • 제1출항항로 	제 1 출 항 항 로
13	<ul style="list-style-type: none"> • 울산 묘박지 등 → 제1입항항로 • 제1입항항로 	제 1 입 항 항 로
14	<ul style="list-style-type: none"> • 화암부두 → 제1입항항로 • 제1입항항로 	제 1 입 항 항 로

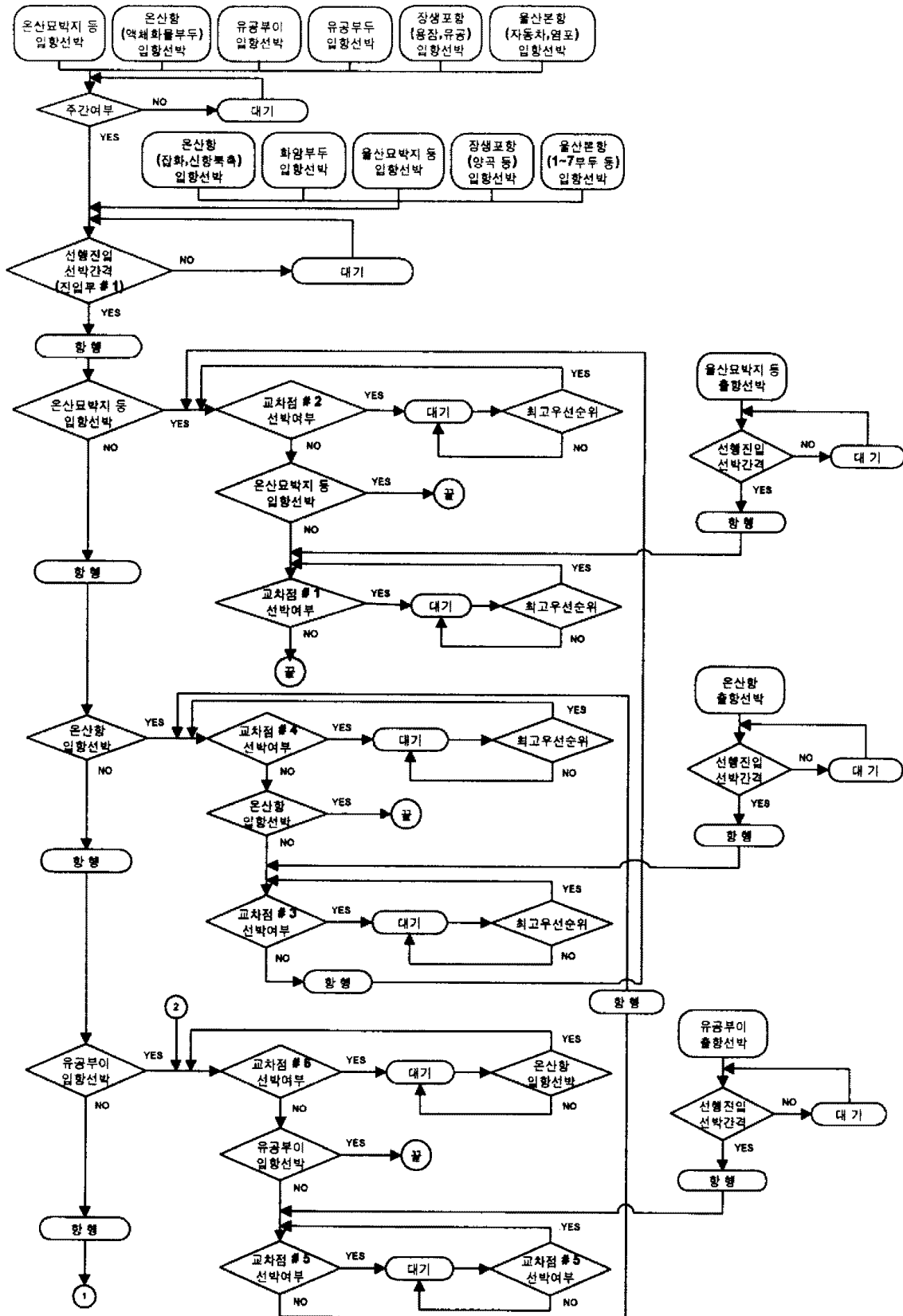


Fig. 3(a) Flow Chart to evaluate the Traffic Congestion in Channels

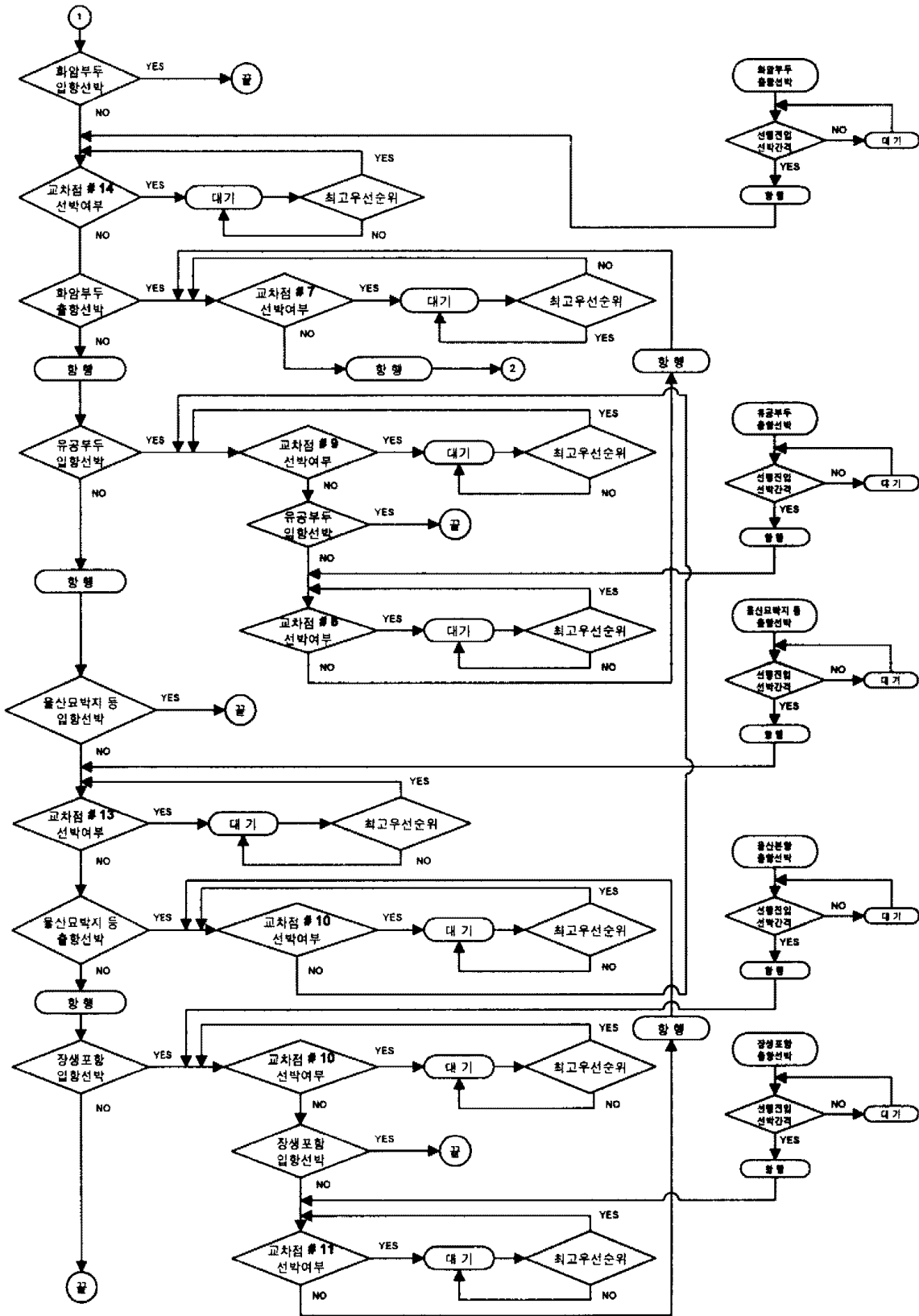


Fig. 3(b) Flow Chart to evaluate the Traffic Congestion in Channels

(3) 모델에 사용된 데이터

가. 항로내 선박의 속력과 항행시간
 항로내 각 교차점간의 항로길이를 선박조종 시물

레이션 결과 획득한 평균선속으로 나누면 Table 9
 와 같이 각 교차점간의 항행시간이 계산된다.

Table 9 Channel Length and Average Pilot Time

영역별	선박항행경로	항로 길이 (mile)	평균 선속 (kts)	항행시간 (분)
온산 묘박지 등	•입항: 1진입부 → 2교차부	1.2	9	8
	•출항: 9진입부 → 1교차부	1.3	5	16
온 산 항	•입항: 1진입부 → 4교차부	2.1	9	14
	•출항: 8진입부 → 3교차부	1.8	5	22
	3교차부 → 2교차부	0.7	9	5
유공부이	•입항: 1진입부 → 6교차부	2.9	8	22
	•출항: 7진입부 → 5교차부	0.5	5	6
	5교차부 → 4교차부	0.6	7	5
화암부두	•입항: 1진입부 → 14교차부	4.2	8	32
	•출항: 6진입부 → 14교차부	0.3	5	4
	14교차부 → 7교차부	-	-	무시
	7교차부 → 6교차부	1.1	7	9
유공부두	•입항: 14교차부 → 9교차부	0.5	7	4
	•출항: 5진입부 → 8교차부	0.3	5	4
	8교차부 → 7교차부	0.5	7	4
울 산 묘박지 등	•입항: 14교차부 → 13교차부	0.8	7	7
	•출항: 4진입부 → 13교차부	0.3	5	4
	13교차부 → 10교차부	-	-	무시
	10교차부 → 9교차부	0.2	7	2
장생포항	•입항: 13교차부 → 12교차부	0.2	7	2
	•출항: 3진입부 → 11교차부	1.1	5	13
	11교차부 → 10교차부	0.2	7	2
울산 본항	•출항: 2진입부 → 12교차부	1.6	5	19
기 타	• 2교차부 → 1교차부 • 4교차부 → 3교차부 • 6교차부 → 5교차부 • 14교차부 → 7교차부 • 9교차부 → 8교차부 • 13교차부 → 10교차부 • 12교차부 → 11교차부	-	-	무시

Table 10 Average Arrival Time Interval

영역별	부두별	입항척수	비율(r)	평균도착 간격(분)	도착분포
울산분항	석탄부두, 1~7부두, 일반부두, 현대미포	5,304	0.1750	99.1	지수분포
	자동차부두, 염포부두	813	0.0268	646.5	"
장생포항	양곡부두, 동양부두, 현대정공 돌핀, 장생포부두	3,557	0.1173	147.8	"
	용잠부두, 유공2부두, 유공1부두	1,381	0.0456	380.6	"
울산 묘박지 등	M박지, 검역박지, 기타	3,443	0.1136	152.7	"
유공부두	3~8부두, 가스부두	2,167	0.0715	242.5	"
화암부두	화암부두	759	0.0250	692.5	"
유공부이	유공부이(I, II)	148	0.0049	3,551.4	"
온산항	온산 1~4부두, 정일부두, 쌍용 정유 돌핀, 쌍용돌핀, 대한유화부두, 기타 액체화물 계획부두	5,051	0.1666	104.1	"
	잡화 계획부두, 신항만 북측지역부두	6,690	0.2207	78.6	"
온산 묘박지 등	쌍용부이, 유공부이(III), M박지, 검역박지, 기타	1,000	0.0330	525.6	"
합	계	30,313	1.0000	-	

나. 선박의 도착시간 분포

모든 선박은 지수분포에 따라 항로의 진입부에 도착하며, Table 10의 평균도착 시간간격에 의하여 발생한다.

다. 교차점 통과시간

일반적인 경우 2~3분이 소요되나 보수적인 결과를 위하여 4분으로 가정한다.

라. 모델의 수행시간

모델은 분단위로 수행되며, 1년(525,600분)의 기간동안 수행한다.

마. 선박간 최소 진입간격

항로내에서 안전을 위하여 최소 이격거리를 유지하며, 수로내에서 9노트로 항행할 경우 선박의 최소 진입간격은 Table 11과 같다.

Table 11 Min. Time Interval required to enter Each Channel

영역별	부두별	평균 선박크기 (천G/T)	선박길이 (m)	최소 이격거리 (m)	최소진입 시간간격 (분)
울산분항	석탄부두, 1~7부두, 일반부두	5.7	115	1,522	5.5
	자동차부두, 염포부두	18.4	150	1,985	7.1
장생포항	양곡부두, 동양부두, 현대정공 돌핀, 장생포부두	1.2	70	926	3.3
	용잠부두, 유공2부두, 유공1부두	3.2	100	1,323	4.8
울산묘박지등	M박지, 검역박지, 기타	4.4	100	1,323	4.8
유공부두	3~8부두, 가스부두	12.7	150	1,985	7.1
화암부두	화암부두	2.8	70	926	3.3
유공부이	유공부이(I, II)	113.3	290	3,837	13.8
온산항	온산 1~4부두, 정일부두, 쌍용 정유돌핀, 쌍용돌핀, 대한유화부두, 기타 액체화물 계획부두	6.3	115	1,522	5.5
	잡화 계획부두, 신항만 북측지역 부두	9.8	130	1,720	6.2
온산묘박지등	쌍용부이, 유공부이(III), M박지, 검역박지, 기타	26.5	200	2,646	9.5

(주) 최소 이격거리는 항로상의 평균 선속 9Kts를 기준으로 계산함.

4.3 시뮬레이션을 이용한 혼잡도 평가 결과

시뮬레이션의 결과로부터 얻을 수 있는 자료로는 이용 부두별 평균대기시간 및 평균대기선박수, 항로의 각 진입부 및 각 교차점에서의 대기선박수 등이며, 시뮬레이션 특성상 시뮬레이션 수행기간(1년, 525,600분) 동안의 최대 대기선박수 등도 구할 수 있다.

1) 평균대기시간

(1) 선종에 따른 야간 입항도선의 제한에 따른 평균대기시간은 182분, 평균대기선박수는 3.7척, 최대대기선박수는 32척으로 분석된다. 이 때 신항만 개발전과 비교하면, 신항만 개발에 따른 대기시간의 증가는 1.7% (3분)에 불과하여 신항만 개발에 따른 교통량의 증가

가 항로 혼잡도에는 그 영향이 미미함을 알 수 있다.

- (2) 제 1항로 입항시 선박 최소진입간격에 따른 평균대기시간은 신항만 교통량이 제외된 경우 2.18분이었으나, 신항만 개발에 따른 교통량을 고려할 경우 2.25분으로 거의 대기가 발생하지 않는 것으로 평가된다.
- (3) 기타 각 부두 출항시 선박 최소진입간격에 따른 평균대기시간이나 각 교차점에서의 평균대기시간은 최대 1분을 넘지 않으므로 거의 대기가 발생하지 않는 것으로 평가된다.

2) 평균대기선박수

울산 분항인 제1항로상에 있어서는 진입부에서 위험물 운반선의 야간 입항통제에 따라 평균 3.7척

의 대기선박이 발생하는 것 이외에 다른 접이안 통항량에 따른 대기는 매우 미미하므로 신항만 건설에 따른 혼잡도 발생은 거의 없는 것으로 판단된다.

3) 항로 이용시간의 영향

야간 입항통제시간을 12시간에서 6시간으로 줄이면 평균대기시간은 182분에서 44.4분으로 75.6%가 줄어들게 된다. 그러나, 위험물 운반선에 대한 야간 입항통제시간을 완화하면 그만큼 사고 발생 위험은 증대될 것이므로 현행 12시간 야간 통제의 체계를 유지함이 바람직할 것으로 판단된다.

5. 결 론

항로의 혼잡도 평가는 개항질서법의 적용을 받는 항계내의 항로와 해상교통안전법에 근거한 특정해역의 항로지정방식에 의한 항로 및 좁은 수로 등에서의 항로에 대하여 항법의 차이에서 기인하는 제약에 의거, 각기 달리 평가되어야 한다.

본 연구는 항계내 항로의 혼잡도 평가기법의 개발과 적용을 목적으로 울산 신항만 개발에 따른 울산항내 항로 혼잡도를 평가하였다. 항로의 혼잡도는 대기행렬이론(Queueing Theory)과 선박항행 시뮬레이션기법을 이용하여 평가하는데, 특히, 울산항만의 경우 신항만 남측 및 미포항과 같은 단일

식선항로 진입부에 있어서는 대기행렬이론을 사용하였고, 대기행렬이론이 불가능한 제1항로상에서 항로의 분기점에 대하여는 선박항행 시뮬레이션기법을 사용하였다.

울산항만의 항로 혼잡도 평가 결과 신항만 개발에 따른 교통량의 증가가 항로 혼잡도에 별 영향을 주지 않는 것으로 평가되었다.

참고문헌

- 1) 藤井弥平 외 2명, 海上交通工學, 海文堂, PP.119-140, 1981.
- 2) 藤井弥平 외 2명, 交通システム工學(I), コロナ社, PP.91-97, 1985.
- 3) 구자윤, 협수로의 교통량에 따른 혼잡도 평가에 관하여, 한국항해학회지 제21권 제2호, PP 19 - 40, 1997. 6.
- 4) 해양수산부, 부산(가덕) 신항만 선박조종 시뮬레이션 및 항로검토 용역, 1997.6
- 5) 해운항만청, 신항만투자우선순위 평가최종보고서, 1996.7, III-189~III-191
- 6) 해양수산부, 울산신항만개발 기본계획용역 보고서, 제1권 기본계획편, 1996.12
- 7) Lim, C.S., Channel Capacity Models: Strategic Use of Navigational Channels, P.27~45

