

외력에 따른 항로 폭 설정을 위한 항만 및 어항 설계기준에 관한 연구

이대한* · 권유민**†

* 국립목포해양대학교 대학원, ** 국립목포해양대학교 항해학부 교수

A Study on Proposing the Harbor and Fishery Design Criteria for the Channel Width based on External Factors

Dae-Han Lee* · Yu-Min Kwon**†

* Graduate School, Mokpo National Maritime University

** Professor, Division of Navigation Science, Mokpo National Maritime University

요약 : 항만 및 어항 설계기준에서는 항로의 설정 시 선박의 안전 항행을 보장하고 조선이 용이하도록 설계되어야 한다고 정의하고 있다. 그중 항로 폭 설정은 항로를 설정함에 있어 중요한 조건 중 하나이다. 그러나 우리나라 항로 폭 설정 기준은 국외의 정량적 평가 기준과 비교하여 정성적 평가 기준에 비중이 있다. 선박이 항주 중에 받는 저항에 직·간접적으로 영향을 미치는 것이 바람, 조류, 파랑 등의 자연환경 요소이다. 자연환경 요소의 크기에 따라 항주 중인 선박에 미치는 영향이 안전 운항에 위협이 되기도 한다. 이를 방증하듯 우리나라에서는 자연환경 여건에 따라 선박 출항 통제를 규정하고 있다. 이처럼 선박 안전 운항에 밀접한 관계가 있는 자연 환경적 요인을 반영하기 위해 국외의 항로 설계지침에서는 자연환경 요소들의 정량적 평가 기준을 제시하여 항로 폭 설계 시 반영하고 있지만 우리나라는 외력을 고려한 구체적인 평가 기준이 마련되어 있지 않은 실정이다. 본 연구에서는 목포항 입·출항 선박들의 항적을 기초 자료로 활용하여 실제 선박들이 운항하면서 사용한 항로 폭과 자연환경 요소와의 관계를 분석하고 이를 바탕으로 조류 크기에 따른 필요 항로 폭을 제시하고 국외의 항로 설계지침과 비교하였다.

핵심용어 : 항만 및 어항 설계기준, 항로 폭 설정, 자연환경 요소, 선박 항적, 외력

Abstract : Harbor and Fishery Design Criteria defines that ship routing should be designed to ensure safe ship navigation and easy maneuvering. The design of the channel width is one of the critical conditions in routing of ships. For the criteria of the channel width, qualitative evaluation criteria are used in South Korea, whereas quantitative evaluation criteria are used in other countries. Environmental factors, such as winds, tidal currents, and waves directly or indirectly affect ship resistance when sailing. Depending on their strength the environmental factors may pose a threat to the safe navigation of ships. Thus, vessel traffic control was regulated in South Korea according to the Beaufort scale. In order to design the channel width to reflect the environmental factors closely related to the safe navigation of ships, quantitative evaluation criteria reflected with environmental factors were presented in other countries, however, these external factors were not considered in South Korea. This study analyzed the relationship between the channel width actually used by ships and environmental factors by using the trajectories of ships entering and leaving Mokpo Port. This study also suggested the required channel width according to tidal currents and compared it with the channel width design criteria of other countries.

Key Words : Harbor and Fishery Design Criteria, Design of route width, Environmental factor, Ship trajectory, External factors

* First Author : ydhan@mmu.ac.kr, 061-240-7051

† Corresponding Author : ymk@mmu.ac.kr, 061-240-7170

1. 서론

해사안전 증진과 선박의 원활한 교통에 이바지함을 목적으로 하는 해사안전법에서는 해양수산부장관에게 선박이 통항하는 수역의 지형·조류, 그 밖에 자연적 조건 또는 교통량 등으로 해양사고가 일어날 우려가 있다고 인정하면 항로를 지정할 수 있도록 하고 있다(MOF, 2024).

항로는 이를 이용하는 선박의 안전 항행이 보장될 수 있도록 적정 수심과 폭 유지가 필요하며, 항만 및 어항 시설의 설계에서 고려하여야 하는 설계조건에 필요한 사항을 정함을 목적으로 하는 우리나라 항만 및 어항설계기준에서는 항로, 정박지 및 선회장 등의 수역시설에 관한 설계기준을 명시하고 있다(MOF, 2017a).

항만 및 어항설계기준에 따른 항로 폭의 설정은 대상 선박의 제원, 항로의 교통상황 및 교통흐름, 항로길이, 해상교통량, 조류의 세기나 방향 등과 같은 기상, 해상조건과 그 외의 자연 상황 등을 충분히 고려하도록 하고 있으며, 특수한 항로는 선박 관계자의 의견을 청취하고 선박 조종시뮬레이션 결과를 반영토록 하고 있다(MOF, 2017b).

규모의 경제를 실현하기 위해 선박이 대형화되는 추세로 조류나 바람 등의 외력이 선박에 미치는 영향이 증가하기 때문에 이는 선박 조종성능 및 통항 안전성에 영향을 미칠 수밖에 없다. 이런 상황에서 항로 폭을 설정함에 기상, 해상조건을 적절히 적용하는 것은 수역의 안전 확보를 위한 중요 고려 요소 중 하나이지만, 국외의 항로 폭 설계기준과 비교하여 항만 및 어항 설계기준에서는 기상, 해상조건에 따른 정량적인 명확한 기준이 없는 실정이다.

국내에서 Yang et al.(2012)와 Seong(2014)은 해상교통의 흐름을 고려한 항로 폭 설정에 관한 연구를 수행하였다. Yang et al.(2012)는 선박의 대형화는 물론 해상교통량을 포함한 해상 시설물의 증가로 공간적 제약과 매립 등으로 항행 수역이 감소하여 해상교통이 혼잡한 상황에서의 위험성을 강조하였다. 앞으로의 변화에 대응하기 위해 환경스트레스 모델로 평가한 선박 교통량을 기준으로 항로 폭을 계산하여 항로별 적절한 항로 폭을 제안할 수 있을 것으로 기대하였다. Seong(2014)의 연구에서는 항로 폭 설계법은 해당 수역을 통항하는 최대 선박의 운동 성능만을 중심으로 설계되고 있어 다양한 종류의 선박이 혼재되어 운항하고 있는 해상교통 환경을 고려하지 않음을 지적하고 162개의 해상교통 시뮬레이션을 하고 교통량에 따른 운항위험도를 추정하여 해상교통의 흐름을 고려한 적정한 항로 폭 설계법을 제시하였다.

Kim(1995)은 바람, 조류 및 파도 등과 같은 외부 자연 환경적인 영향은 선박이 제 항로로 가기 위해서는 Drift Angle 을 가지고 항해하도록 선체에 힘을 미치므로 선박의 항적

폭을 외력의 영향이 없는 경우보다 훨씬 넓게 만드는 직접적인 요인으로 작용하므로 항로의 설계에 반드시 고려되어야 할 중요한 요소 중 하나이며 조류와 바람이 함께 영향을 미치는 구역에서는 항로 폭을 결정하는데 특별히 고려해야 할 필요성을 언급하였다.

배속 시뮬레이션(Fast Time Simulation)을 활용한 Kim(2019)의 연구는 현재의 국내 항만 설계기준의 항로 폭 산정에서 선박 요인과 환경적 요인 등의 세부적인 검토 기준이 미흡하여 대상 선박을 선정하여 선박 요인들을 특정하고 환경적 요인으로 자연조건을 특정하여 대형 선박의 최소 필요 항로 폭 산정을 위한 기준을 제시하였다.

국내 항로 폭 설정과 관련한 연구에서는 선박의 교통량을 반영한 항로 폭 설계법을 제시하거나 외력이 고려되어야 할 필요성에 대하여 제시를 하였지만, 외력에 따라 실제 선박이 안전하게 통항하는 데 필요한 항로 폭에 관해 연구한 사례는 부족하였다.

국의 항로 폭 설계에 대한 기준은 UN 자문기구이며 항만, 내륙수로, 연안 지역의 개발 및 수상교통 기술정보 교환과 국가 간 협력을 목적으로 설립된 국제수상교통시설협회(Permanent International Association of Navigation Congress, 이하 PIANC)에서는 유럽 지역은 물론 세계적으로 사용되고 있는 Harbour Approach Channels Design Guidelines(2014)를 제시하고 있다(PIANC KOREA, 2024). 또한 미 육군 공병대(US Army Corps of Engineers, 이하 USACE)의 Hydraulic Design of Deep Draft Navigation Projects(2006), 일본 국제 임해 개발 연구 센터(The overseas Coastal Area Development Institute of Japan, 이하 OCDI)의 Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan(2009)에서도 항로 폭을 결정함에 기상, 해상환경 조건을 고려 요소로 선정하고 정량적으로 반영할 수 있도록 기준을 제시하고 있다.

본 연구는 실제 선박의 운항 항적을 바탕으로 필요 항로 폭을 분석한 후 분석 결과를 바탕으로 기상, 해상조건 변화에 따른 필요 항로 폭의 상관관계에 대하여 검토하고, 그 결과를 바탕으로 향후 외력을 고려한 적정 항로 폭 설계를 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

2. 국·내외 항로 설계기준

2.1 국내 항로 설계기준(2017)

항만 및 어항설계기준(MOF, 2017b)에서는 일반항로의 항로 폭을 설계함에 선박이 운항 중 교행 가능성이 있는 항로와 선박이 운항 중 교행 가능성이 없는 항로로 구분하여 선박의 전장(L)을 조건으로 Table 1과 같이 제안하고 있다.

선박 운항 중 교행 가능성이 있는 항로에서는 1L 이상의

적절한 폭으로 하되, 항로의 길이가 길거나 선박이 빈번하게 교행할 때 최대 2L까지의 항로 폭을 제안하며, 교행 가능성이 없는 항로에서는 최소 0.5L 이상의 폭을 제안하고 항로 폭이 1L이 되지 않는 항로에서는 추가적인 대비를 제안하고 있다(MOF, 2017b).

기상, 해상조건과 그 외의 자연 상황 등을 충분히 고려하여 항로 폭을 정하게 되어있지만, 선박의 전장에 관한 기준만을 정량적으로 제시할 뿐 자연 상황에 대한 세부 기준은 제시하지 않고 있다.

Table 1. Korea design standard channel width

One-way		Two-way	
Route	0.5L or more (※ If the width of the route is less than 1L, sufficient preparation for safety is required.)	1L or more	In case of long route 1.5L
			In case of frequent intercourse 1.5L
		In case of frequent intercourse and a relatively long route 2L	

2.2 PIANC Guidelines(2014)

국제수상교통시설협회(PIANC)의 Harbour approach channels design guidelines(2014)에서는 선박의 고유한 조종성능, 선박 운항자의 능력, 선박 운항자가 사용할 수 있는 시각적 신호, 전반적인 가시성 등의 요소를 평가한 기본 조정성능(W_{BM})과 바람, 조류, 파랑, 항해보조설비, 수심, 위험화물의 종류를 평가한 환경 및 기타 요소(W_i)를 고려하여 항로 폭을 설계한다.

환경 및 기타 요소(W_i) 중 해상환경에 의한 외력의 영향을 허용하여 안전한 항해를 보장할 수 있는 충분한 너비를 Table 2와 같이 제시하고 있다.

해상환경에 의한 외력은 선박의 속도가 작을수록 선박에 미치는 영향이 커지기 때문에 각각의 해상환경적 요소는 선박에 속도에 따라 기준값을 세밀히 구분하였다.

자연환경에 의한 외력의 영향을 살펴보면 선박에 횡 방향에서 부는 바람은 바람의 세기에 따라 선박의 폭(B)을 기준으로 최소 0.1B에서 최대 1.1B까지의 값을 제시하고 있으며 선박에 횡 방향에서 발생하는 조류에 따른 기준은 0에서 최대 1.6B까지 제시하고 있다. 또한, 선박의 종 방향에서 발생하는 조류는 0에서 최대 0.4B까지 제시하며 파도의 높이에 따라서 0에서 최대 1.0B까지 선박의 안전한 항해를 보장할 수 있는 너비로 제시하고 있음을 알 수 있다.

Table 2. Additional widths for straight channel sections

Width W_i	Vessel Speed	Outer Channel (open water)	Inner Channel (protected water)
(b) Prevailing cross wind V_{cw} (knots)			
- mild $V_{cw} < 15$ knots ($<$ Beaufort 4)	fast		0.1B
	mod		0.2B
	slow		0.3B
- moderate $15 \text{ knots} \leq V_{cw} < 33$ knots (Beaufort 4 - Beaufort 7)	fast		0.3B
	mod		0.4B
	slow		0.6B
- strong $33 \text{ knots} \leq V_{cw} < 48$ knots (Beaufort 7 - Beaufort 9)	fast		0.5B
	mod		0.7B
	slow		1.1B
(c) Prevailing cross-current V_{cc} (knots)			
- negligible $V_{cc} < 0.2$ knots	all	0.0	0.0
	fast	0.2B	0.1B
- low $0.2 \text{ knots} \leq V_{cc} < 0.5$ knots	mod	0.25B	0.2B
	slow	0.3B	0.3B
- moderate $0.5 \text{ knots} \leq V_{cc} < 1.5$ knots	fast	0.5B	0.4B
	mod	0.7B	0.6B
	slow	1.0B	0.8B
- strong $1.5 \text{ knots} \leq V_{cc} < 2.0$ knots	fast	1.0B	-
	mod	1.2B	-
	slow	1.6B	-
(d) Prevailing longitudinal current V_{IC} (knots)			
- low $V_{IC} < 1.5$ knots	all		0.0
	fast		0.0
- moderate $1.5 \text{ knots} \leq V_{IC} < 3$ knots	mod		0.1B
	slow		0.2B
- strong $V_{IC} \geq 3$ knots	fast		0.1B
	mod		0.2B
slow		0.4B	
(e) Beam and stern quartering wave height H_s (m)			
- $H_s \leq 1$ m	all	0.0	0.0
- $1 \text{ m} < H_s < 3$ m	all	~0.5 B	-
- $H_s \geq 3$ m	all	~1.0 B	-

PIANC에서는 교통의 흐름을 크게 Table 3과 같이 일방통행과 교행통행으로 분류하고 일방통행은 조정성능(W_{BM})과 환경 및 기타 요소(W_i) 그리고 선박 속도, 안벽 경사 또는 구조, 수로의 단면 및 대칭, 용골 간격, 선박과 안벽 사이의 거리를 고려한 안벽 여유 공간을 위한 추가 폭(W_{BR} , W_{BG})을 합산한 값을 항로 폭으로 산정한다.

교행통행은 일방통행의 기본식에 조정성능(W_{BM})과 환경 및 기타 요소(W_i)의 2배의 값과 교행통행을 위한 추가 폭(W_p)의 요인을 추가한 기본식을 설정하고 각 요인을 대입하여 항로 폭을 산정한다.

Table 3. PIANC design standard channel width

One-way	Two-way
$W = W_{BM} + \Sigma W_i + W_{BR} + W_{BG}$	$W = 2W_{BM} + 2\Sigma W_i + \dots + W_{BR} + W_{BG} + \Sigma W_p$

2.3 Hydraulic Design of Deep Draft Navigation Projects (2006)

미 육군공병대(USACE)의 경우 Table 4와 같이 교통의 흐름, 수로의 형태, 조류의 세기 및 항행보조시설의 설비 상태에 따라 평가하여 필요 항로 폭을 제시한다.

교통의 흐름은 일방통행과 교행통행으로 분류하고 수로의 형태는 천해구역, 운하, 해구로 구분하였다. 항행보조시설의 완벽히 갖추어진 항로와 평균 정도의 항로로 구분하고 조류의 세기를 0.0knots에서 3.0knots까지 3구간으로 분류하여 필요 항로 폭을 설정토록 한다.

특이점은 자연 환경적 요소 중 조류만을 필요 항로 폭 설정 요인으로 지정한 것이다.

Table 4. USACE design standard channel width

	One-way			Two-way		
	Design Ship Beam Multipliers for Maximum Current					
	0.0-0.5 knots	0.5-1.5 knots	1.5-3.0 knots	0.0-0.5 knots	0.5-1.5 knots	1.5-3.0 knots
	Best Aids to Navigation					
Shallow water	3.0B	4.0B	5.0B	5.0B	6.0B	8.0B
Canal	2.5B	3.0B	3.5B	4.0B	4.5B	5.5B
Trench	2.75B	3.25B	4.0B	4.5B	5.5B	6.5B
	Average Aids to Navigation					
Shallow water	3.5B	4.5B	5.5B	-		
Canal	3.0B	3.5B	4.0B			
Trench	3.5B	4.0B	5.0B			

2.4 Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan(2009)

OCDI에서는 Class 1(Empirical Approach)과 Class 2(Performance-based Approach) 두 종류로 구분하여 Class 1은 경험적 접근방식으로 국내 항로 폭 설계기준과 동일하나 Class 2는 15척의 선박을 설계 단계에서 사용한 간단한 선형 계산, 추정 방정식, 비선형 운동 방정식에서 선박 유형 및 크기, 풍력과 조력 및 상호 작용력에 대한 유체 역학적 유도체의 계수를 제시하며 항로 폭 설정의 기본 공식으로 선박 조종에 필요한 항로 폭(W_{BM})과 선박에 작용하는 기타 간섭력에 따라 필요한 추가적인 항로 폭(W_{IF})을 합한 값으로 나타내며 요소들

의 값은 바람과 조류의 영향을 포함한 7가지의 세부 요인으로 구성된다.

Table 5를 보면 기본 공식에 적용 가능한 요인을 일방통행, 교행통행, 4방향 통행으로 분류하고 각 통행유형에 상이한 계수를 적용하여 최종적으로 항로 폭을 제시한다.

일방통행에서 $a=1, b=c=0$, 교행통행에서 $a=2, b=1, c=0$, 4방향 통행에서 $a=4, b=1, c=2$ 의 계수를 적용한다.

Table 5. OCDI design standard channel width

	One-way	Two-way	Four-way
Basic expression	$W = W_{BM} + W_{IF}$ $W_{BM} = a(W_{WF} + W_{CF} + W_{YM} + W_{DD})$ $W_{IF} = W_{BA} + bW_{PA} + cW_{OV}$		
Factor	a	1	2
	b	0	1
	c	0	0
		2	2

W_{WF} : width requisite against Wind Forces
 W_{CF} : width requisite against Current Forces
 W_{YM} : width requisite against Yawing Motion
 W_{DD} : width requisite for Drift Detection
 W_{BA} : width requisite against Bank Effect forces
 W_{PA} : width requisite against two-ship interaction in Passing
 W_{OV} : width requisite against two-ship interaction in Overtaking

3. 연구방법

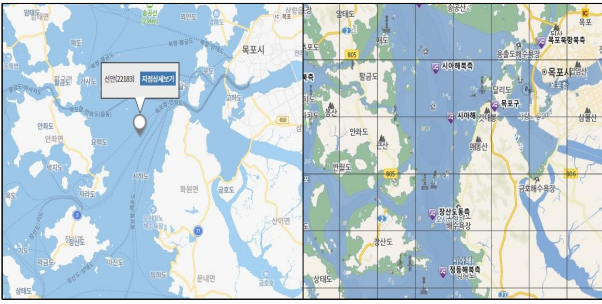
우리나라는 OCDI의 Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan(2009)에서 대상 선박 및 항행 환경을 특정할 수 없을 때 적용하는 Class 1(Empirical Approach)의 기준만을 요구하고 있다. 국외의 항로 설계기준과 같이 자연 상황을 필요 항로 폭 설정의 요소로 설정함의 타당성을 검토하기 위해서 실제 선박이 통행하는 항로의 선박 항적 자료와 당시의 기상 자료를 분석하였다.

3.1 조사 항로 설정

본 연구의 조사 항로를 설정함에 다음과 같은 기준을 만족하는 목포 입·출항 항로를 선정하였다.

- 1) 기상 자료를 수집할 수 있는 항로
- 2) 자연환경의 변화가 큰 항로
- 3) 선박의 움직임을 조사하기 용이한 직선 항로

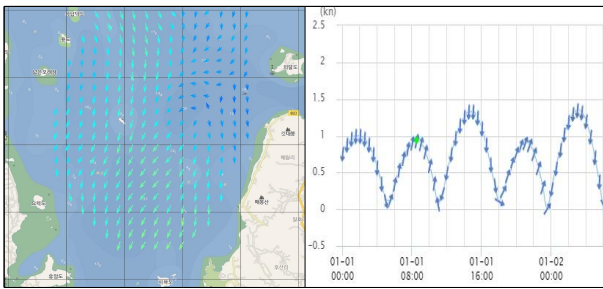
목포 입·출항 항로에서 기상 자료를 수집할 수 있는 관측소의 위치는 Fig. 1과 같다. 바다누리 해양정보서비스에서 관측 자료를 토대로 시아해 해역에 대한 매일의 유속 등의 예측을 산정한 관측 자료와 광주지방기상청 목포기상대에서 운영하는 신안(22183) 해양기상부이에서 풍속 관측 자료를 수집하였다.



<Chart Source : <http://www.khoa.go.kr>>

Fig. 1. Meteorological observation of Mokpo.

국립해양조사원 해양정보도의 최근 15년(2003~2017년)간 조위 관측소별 평균대조차 자료에 목포는 382.7cm의 평균대조차를 보였다. 바다누리 해양정보서비스에서 Fig. 2와 Table 6과 같이 목포 입·출항 항로의 조류도 및 유향·유속 자료를 수집하였다.



<Chart Source : <http://www.khoa.go.kr>>

Fig. 2. Tidal current observation of Mokpo.

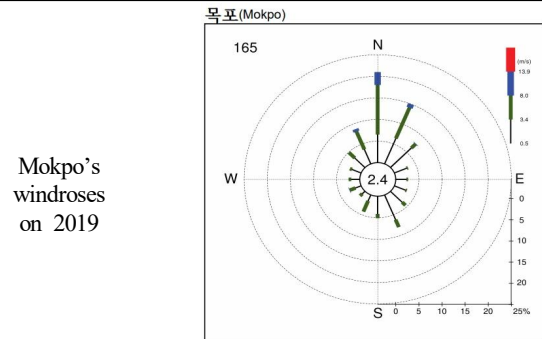
Table 6. Flowmeter logging table of Mokpo

Observation time	Flow Direction(°)	Flow velocity(kn)
2019-01-01 00:00:00	South	0.76
2019-01-01 00:30:00	South	0.88
⋮	⋮	⋮
2019-01-01 05:00:00	SSE	0.12
2019-01-01 05:30:00	NNE	0.13
2019-01-01 06:00:00	NNE	0.35
⋮	⋮	⋮

Table 7은 2019년 목포의 바람장미를 나타내며, 2019년 1년 동안 무풍(0.5m/s 미만)일 경우는 2.4%로 관측되었다. 대부분 선박이 목포 입·출항 시 바람의 영향을 받았으며 연간 목포의 바람자료를 살펴보면 바람의 변화를 확인할 수 있다. 바람의 평균풍속은 2월에 4.3m/s로 가장 강하게 불고 최대풍속과 최대순간풍속은 9월에 기록되었다.

Table 7. Annual wind data of Mokpo

Wind (m/s)	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.
Mean Speed	4.1	4.3	4.0	3.0	3.2	2.7
Highest Speed	12.7	14.0	13.3	9.7	13.3	9.1
Highest Gust Speed	18.1	19.6	19.1	14.8	18.8	13.7
Wind (m/s)	Jul.	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
Mean Speed	3.1	2.8	2.9	3.2	3.9	4.1
Highest Speed	9.2	9.3	15.8	11.8	13.1	14.0
Highest Gust Speed	15.8	16.0	26.5	16.2	18.0	21.2



Mokpo's windroses on 2019

<Source : Annual climatological report(2019)>

한국도선사협회의 목포항 Passage plan에서 Fig. 3과 같이 입항 시 침로 000도, 출항 시 침로 180도 직선항로로 설정된 구간 중 일부 구역을 조사 항로로 설정하였다.



<Chart Source : EyeMTAS, Administrative electronic chart>

Fig. 3. Investigation route Port of Mokpo.

목포 입·출항 직선항로의 대상 구역은 항로 폭이 약 760m, 항로길이는 약 5,595m이며, 선박의 항적 자료는 2019년 1월 8일부터 14일, 4월 1일부터 7일, 6월 10일부터 16일, 8월 31일 9월 6일, 9월 13일부터 19일, 2021년 1월 10일부터 16일까지 총 42일간의 자료를 분석하였다.

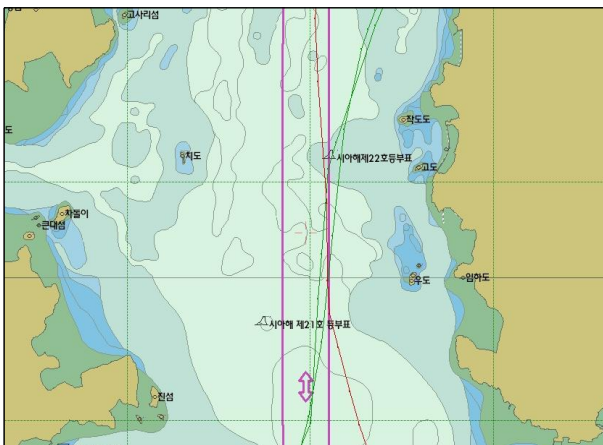
3.2 대상 선박

43일간의 통항 선박은 Table 8과 같이 총 9,068척으로 분석되었다. 선박들의 항적 확인 결과 어선 및 소형선은 항로를 이용하지 않고 항로 밖에서의 항행이 대부분이었으며, 그 비율은 어선이 2,995(33.0%), 기타 선종이 2,838척(31.3%)으로 조사되었다.

Table 8. Classification of survey vessels

Ship type	Number of ships	
	(ships)	(%)
PASSENGER SHIP	464	5.1
GENERAL CARGO SHIP	1,718	18.9
DANGEROUS CARGO SHIP	688	7.6
TUGBOAT	352	3.9
PILOT BOAT	13	0.1
FISHING BOAT	2,995	33.0
THE OTHERS	2,838	31.3
TOTAL	9,068	100.0

대상 선박은 항로를 이용하는 1만 톤 이상의 선박 1,001척으로 선정하였으며, 섬 시하도를 기준으로 시하도의 좌측은 항로로 설계되어 있지만 시하도의 우측의 경우 항로는 아니지만 중·소형의 선박이 통항하기에 충분한 수역으로 Fig. 4와 같이 조사 항로 구간 통항 중 시하도 우측으로 통항하기 위해 분명한 의도를 가지고 자력으로 항로를 벗어난 선박의 항적은 제외하였다.



<Chart Source : EyeMTAS>

Fig. 4. Off course of investigation route.

선박이 항로의 계획된 침로를 반듯이 항행하려 할 때 외력에 따른 영향을 받는다. 선박은 Fig. 5와 같이 외력의 영향

으로 선박이 좌우로 이동하는 움직임의 항적이 나타난다. 이를 Harbour Approach Channels Design Guidelines(2014)에서는 Slightly Oscillatory Course라고 표현하였다. 선박은 외력의 영향이나 항로 위 타 선박 또는 물체를 피하고자 선박 폭 이상의 공간을 사용하면서 통항하게 된다. 이처럼 선박이 항로 통항에 실제 사용한 항로 폭은 선박의 크기와 외력의 영향을 함께 고려하여야 한다.

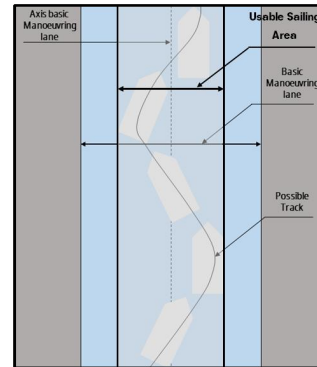


Fig. 5. Basic manoeuvring lane.

본 연구는 조사 항로를 실제 통항한 45척 선박, 108건(출항 53건, 입항 55건)의 항적을 바탕으로 항로 폭을 계산하고 선박 통항 당시의 유속과 풍속과의 관계를 분석하였다.

4. 분석결과

4.1 Pearson 상관분석 결과

조사 항로를 정기적으로 운항하는 여객선 A는 총 108개의 표본 중 25개(23.1%)의 표본으로 가장 많은 분석 대상이다. 여객선 A는 총톤수 30,343G/T, 길이 192m, 폭 27m의 제원을 가지고 있다.

여객선 A는 조사 기간 중 조사 항로를 통항하면서 가장 적은 항로 폭을 사용한 경우 38.11m로 선박의 폭의 약 1.4배의 항로 폭을 이용한 것으로 조사되었으며 가장 많은 항로 폭을 사용한 경우는 327.02m로 선박의 폭의 약 12배를 사용한 것으로 조사되었다. 활용한 항로의 폭을 선박 제원 중 선박의 폭과 길이로 나누어 선박의 폭 비와 선박의 길이 비로 환산하여 통항 중 최대유속과 최대풍속과의 관계를 분석하였다.

선박이 통항하면서 받는 외력, 최대유속과 최대풍속이 선박이 미치는 영향을 통항 중 선박이 활용한 항로의 폭과 어떠한 연관이 있는지 조사하고 선박에 작용하는 외력과 선박이 활용한 항로의 폭 사이의 선형 관계의 강도와 방향을 알고 외력에 따른 필요 항로 폭을 예측하고자 Pearson 상관분석을 하였다.

본 연구에서 유속과 풍속의 관계를 이해하고 데이터 내 패턴이나 경향성을 파악하기 위해 Pearson 상관분석을 사용하였다. 특히 한 변수가 다른 변수의 변화를 예측하는 데 도움을 주는 장점이 있다.

Pearson 상관분석에 앞서 Fig. 6 ~ Fig. 9와 같이 선박 폭 비에 대한 유속 및 풍속과의 산점도와 선박 길이 비에 대한 유속 및 풍속과의 산점도를 확인하였다.

Fig. 6은 유속과 항로 사용 폭을 대상 선박의 폭으로 나눠 환산한 선박의 폭 비와의 산점도이며, Fig. 7은 풍속과 선박의 폭 비와의 산점도를 나타낸다. Fig. 8은 유속과 항로 사용 폭을 선박의 길이로 나눠 환산한 선박 길이 비와의 산점도이며, Fig. 9는 풍속과 선박 길이 비 간의 산점도를 나타낸다.

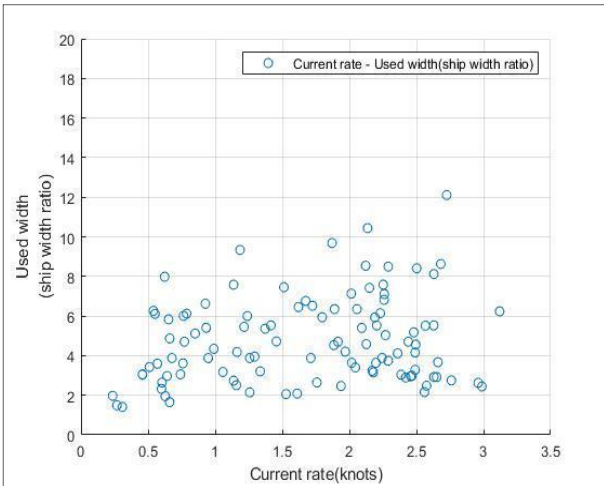


Fig. 6. Scatter plot of used width (ship width ratio) and current rate.

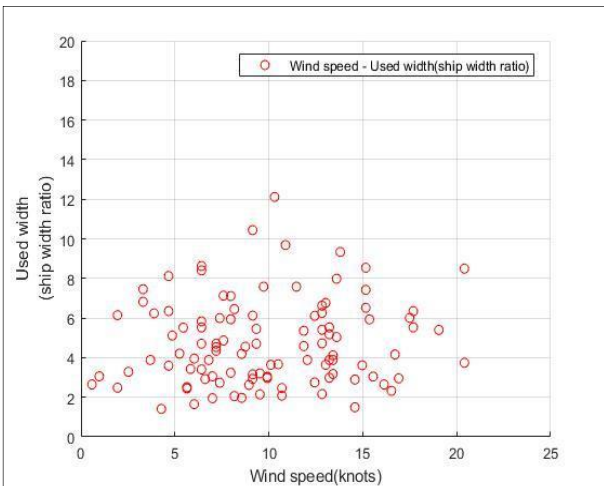


Fig. 7. Scatter plot of used width (ship width ratio) and wind speed.

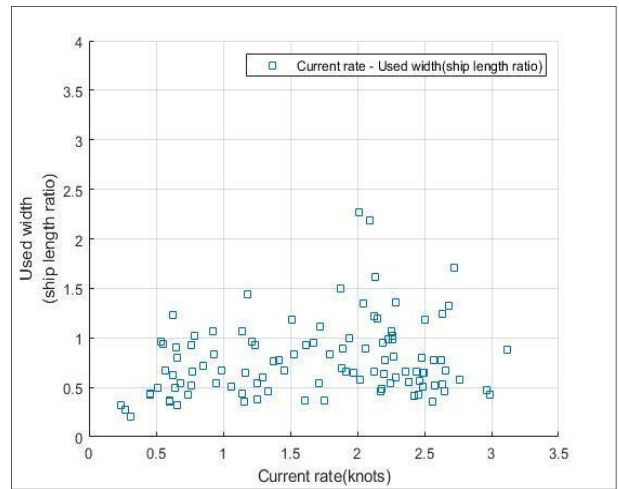


Fig. 8. Scatter plot of used width (ship length ratio) and current rate.

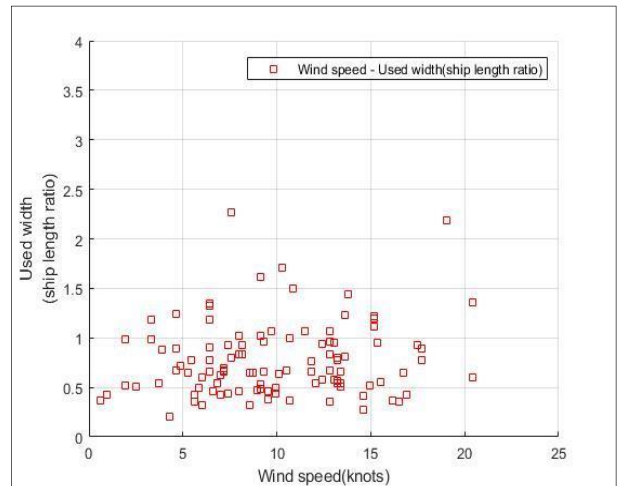


Fig. 9. Scatter plot of used width (ship length ratio) and wind speed.

Pearson 상관분석 결과는 Table 9과 같다. 분석결과 유속과 풍속 간의 상관관계는 유의확률 $p=0.481$ 로 두 변수 간의 상관관계에서 유의한 수준의 결과값이 나타나지 않았다.

유속과 항로 사용 폭에 대한 선박의 폭 비 간의 상관관계 $r=0.219$, $p=0.023$ 의 정적 상관관계를 유속과 항로 사용 폭에 대한 선박 길이 비 간의 상관관계 $r=0.228$, $p=0.018$ 의 정적 상관관계를 보였다.

풍속과 항로 사용 폭 간의 상관관계에서는 선박의 폭 비, 선박 길이 비에 대하여 유의확률이 0.162, 0.082로 유의한 수준의 결과값이 나타나지 않았다.

Table 9. Result of Pearson correlation coefficient

		Flow rate	Wind speed	Used width (ship width ratio)	Used width (ship length ratio)
Flow rate	Pearson's R	1			
	P-Value				
Wind speed	Pearson's R	0.068	1		
	P-Value	0.481			
Used width (ship width ratio)	Pearson's R	0.219*	0.162	1	
	P-Value	0.023	0.162		
Used width (ship length ratio)	Pearson's R	0.228*	0.168	0.824**	1
	P-Value	0.018	0.082	0.000	

*. 상관관계가 0.05 수준에서 유의합니다(양측).
 **. 상관관계가 0.01 수준에서 유의합니다(양측).

4.2 유속별 필요 항로 폭

Pearson 상관분석 결과를 바탕으로 P-value 값이 0.05 미만으로 분석된 유속과 선박의 폭 및 유속과 선박의 길이에 대한 필요 항로 폭을 산출하기 위하여 유속 구간을 1knots 이하, 1~2knots 이하 및 2knots 초과 구간으로 구분하여 신뢰수준 95% 수준의 필요 항로 폭을 산정하였다.

Table 10은 표본의 평균, 표준편차를 바탕으로 유의수준 0.05 기준의 신뢰구간 하한값과 상한값을 나타내고 있다. 유속이 1knots 미만일 경우 선박은 선박의 폭의 3.30~4.62배, 길이의 0.52~0.72배 범위의 최소 항로 폭이 요구되며, 1~2knots 미만일 때는 선박의 폭의 4.05~5.50배, 길이의 0.65~0.86배가 필요하였다. 2knots 이상일 때 선박은 선박의 폭의 4.44~5.77배, 길이의 0.73~0.98배 범위의 최소 항로 폭이 요구되는 것을 알 수 있다.

Table 10. Result of confidence interval

	Flow rate	Average	Standard deviation	Samples	Lower bound	Upper bound
Ship's width ratio	≤1knots	3.96	1.81	29	3.30	4.62
	1~2knots	4.78	2.08	31	4.05	5.50
	2knots<	5.11	2.32	47	4.44	5.77
Ship's length ratio	≤1knots	0.62	0.28	29	0.52	0.72
	1~2knots	0.76	0.31	31	0.65	0.86
	2knots<	0.86	0.44	47	0.73	0.98

상관분석 결과에 통계적 추정 방법으로 조사대상 항로의 유속별 최소 필요 항로 폭 기준을 Table 11과 같이 제안하였다. 교행통행 시 선박 1척에 대한 최소 필요 항로 폭은 선박의 폭에 대하여 1knots 이하의 유속은 3.96B±0.76, 1knots 초과 2knots 이하의 유속 4.78B±0.73, 2knots 초과 유속은 5.11B±0.77이며, 선박 길이에 대하여 1knots 이하의 유속은 0.62L±0.10, 1knots 초과 2knots 이하의 유속 0.76L±0.11, 2knots 초과 유속은 0.86L±0.13으로 나타난다.

Table 11. Result of minimum channel width based on current

	One-way		
Flow rate	≤1knots	1<~≤2knots	2knots<
Ship's width ratio	3.96B±0.76	4.78B±0.73	5.11B±0.77
Ship's length ratio	0.62L±0.10	0.76L±0.11	0.86L±0.13

4.3 비교분석

국의 항로 설계지침과의 비교를 위해 조사 항로에 PIANC 및 USACE 설계지침을 적용한 항로 폭을 산출하였다. 비교를 위한 설계지침은 필요 항로 폭을 선박의 폭으로 산출하고 있으므로, 본 연구에서 제안한 선박의 폭에 대한 결괏값과 비교하였다. 본 연구에서는 조사 항로를 통항하는 단일 선박에 대한 항로 사용 폭에 대한 분석이 이루어졌기 때문에 PIANC, USACE의 설계지침의 비교분석 결과 내용을 일방통행 조건으로 하였다.

일본의 OCDI는 항로를 통항하는 대상 선박을 선정하고 대상 선박들의 조종성능, 선박특성, 선박 간 상호 작용력에 대한 유체 역학적 유도체의 계수를 적용하여 항로 폭을 산출하고 있는 Class 2의 기준으로는 본 연구의 조사 항로에 대한 폭 산출에 한계가 있어 국내 항로 설계기준과 같은 Class 1의 기준과 본 연구의 선박 길이에 대한 필요 항로 폭 제시 값을 비교하였다.

본 연구에서 조사 항로의 필요 항로 폭 설정을 위해 제시한 값과 PIANC(2014), USACE(2006)의 항로 설계지침 기준을 적용한 항로 폭을 비교 결괏값이 Table 12와 같다.

우선 조사 항로에서 조사 기간 가장 강한 조류는 2019년 8월 2일 06시 194도 2.5knots로 기록되어있어 본 연구에서 조류가 2knots 이상일 경우의 결괏값 5.11B±0.77을 제시한다.

PIANC(2014)는 기본 조정성능 요소, 환경 및 기타 요소와 항로의 좌우 여유 폭을 합산하여 항로 폭을 설정하는데 선박의 종류와 통항 속도에 따라 결과가 상이해진다.

기본 조종성능은 선종에 따라 기준이 다르며 유조선과 별 크선은 필요 항로 폭이 가장 크게 설정되어있다. 조사 항로를 통항하는 표본 중 유조선이 포함되어 1.8B를 적용하였다. 환경 및 기타 요소에서는 선박의 속도가 매우 중요한 지표로 선박의 속도가 작을수록 필요 항로 폭이 더 크게 설정이 되어있다. 조사 항로를 통항하는 유조선은 평균 8.4knots의 속도로 항행하여 비교를 위한 선박의 속도 기준은 8.4knots로 하였다. 8.4knots의 속도를 기준으로 하여 환경 및 기타 요소는 0.7B로 산출되었다. 마지막으로 항로의 좌우 여유 폭은 1.6B로 산출되어 최종 결과 PIANC(2014) 기준 조사 항로의 폭은 4.1B로 계산되었다.

USACE(2006) 기준은 일방통행, 조류 1.5~3.0knots, 최상의 항해보조시설, Shallow water가 적용되어 5.0B로 제시된다.

Table 12. Result of comparative analysis of channel width for PIANC (2014) & USACE(2006) guideline of the investigation route

Result	PIANC(2014)	USACE(2006)
5.11B±0.77	4.1B	5.0B

MOF(2017b)와 OCDI(2009)의 Class 1은 같은 기준을 제시하고 선박 폭의 기준이 아닌 선박 길이에 관한 기준을 제시하고 있다.

결과는 Table 13과 같으며 MOF(2017b)와 OCDI(2009)의 Class 1은 단순히 일방통행일 경우 0.5L 또는 그 이상을 제시하며 1L이 되지 않으면 안전에 대해 대비가 필요하다고 명시되어 있을 뿐이다.

Table 13. Result of comparative analysis of channel width for MOF (2017b) & OCDI (2009) guideline of the investigation route

Result	MOF(2017b) & OCDI(2009)
0.86L±0.13	0.5L or more

5. 결론

우리나라 항만의 항로 설계지침에서 항로 폭 설계는 국외의 설계지침과 달리 대략적인 기준만을 제시하고 있다. 항로를 설정함에 항로 폭을 결정하는 사항은 입·출항하는 선박의 안전에 영향을 줄 수밖에 없는 요소이다. 항로 폭에 따라 만일의 사태에 대응할 수 있는 안전수역 유무의 차이는

조선자의 심리상태뿐만 아니라 선박 안전에도 크게 영향을 줄 것이다. 그렇다고 한없이 항로 폭을 넓힐 수도 없는 상황에서 대략적인 기준으로 항로 폭을 설정하기에는 항만 설계의 매우 중요 사항 중 하나이다. 항로 폭을 설정함에 고려해야 할 여러 요인 중 자연 환경적 요인은 항만마다 가지는 특성이 다르기에 설계항만의 특성에 맞춰 고려되어야만 한다.

이에 본 연구는 우리나라의 항로 설계기준과 국외의 기준을 검토하였으며, 국외의 항로 폭 설정 기준은 우리나라의 항로 폭 설정 기준과 달리 자연 환경적 요인 중 특정 요소를 고려하여 항로 폭 결정에 영향을 미치도록 명확히 기준을 제시하고 있음을 확인하였다.

또한, 자연 환경적 요인과 항로 폭과의 관계의 타당성을 검토하기 위하여 자연환경의 변화가 큰 목포항 입출항 항로에 실제 선박이 통항하는 항로의 선박 항적과 통항 당시의 기상 자료를 바탕으로 Pearson 상관분석을 하였다. 그 결과 풍속과 항로 폭 간의 상관관계는 유의하지 않는 수준으로 분석되었으며, 조류와 항로 폭 간의 상관관계는 선박의 폭비에 대하여 유의확률 0.023, 선박 길이 비에 대하여는 0.018로 유의한 것으로 분석되었다. 자연 환경적 요인 중에서도 바람이 선박에 미치는 영향이 크지만 우리나라는 일정 바람세기 이상이 되면 통제가 이루어지기 때문에 바람의 영향과 사용 항로 폭 간의 상관관계 분석에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

본 연구에서 조류의 영향과 사용 항로 폭 간의 분석에서 유의한 수준의 상관관계 결과가 나타났고 이를 통계적 추정을 통해 신뢰수준 95% 수준으로 조류의 세기별 항로 폭 설계 기준을 산출하였다. 그 결과 선박 폭에 대하여 1knots 이하의 유속은 3.96B±0.76, 1knots 초과 2knots 이하의 유속 4.78B±0.73, 2knots 초과 유속은 5.11B±0.77이며, 선박 길이에 대하여 1knots 이하의 유속은 0.62L±0.10, 1knots 초과 2knots 이하의 유속 0.76L±0.11, 2knots 초과 유속은 0.86L±0.13으로 제시하였다.

이번 연구에서는 목포항의 직선 항로만을 대상 해역으로 선정하였기 때문에 향후 추가 연구를 통해 더욱 보편적으로 활용될 수 있는 기준이 필요할 것이다.

항로 폭은 선박의 안전 운항에 반드시 귀결되는 주요 사항 중 하나이다. 항만마다 다른 자연 특성을 고려하여 정량적으로 항로 폭 산출에 적용할 수 있다면 선박이 안전하게 운항할 수 있는 해상교통환경을 마련할 수 있을 것으로 기대한다.

References

[1] Kim, H. S.(1995), A Study On the Safe Width and Alignment

- of the Navigational Channel, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 1, No. 1, pp. 9-25.
- [2] Kim, H. S.(2019), A Study on Decision of Minimum Required Channel Width Considering Ship Types by Fast Time Simulation, Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 26, No. 4, pp. 309-316.
- [3] Ministry of Oceans and Fisheries(2024), Maritime Safety Act, Chapter 1 Article 1 & Chapter 4 Sector 3 Article 31.
- [4] Ministry of Oceans and Fisheries(2017a), Korea Design Standard, KDS 64 40 10, p. 4.
- [5] Ministry of Oceans and Fisheries(2017b), Korea Design Standard, KDS 64 40 10, p. 7.
- [6] Permanent International Association of Navigation Congress (PIANC)(2014), Harbour Approach Channels Design Guidelines.
- [7] PIANC KOREA(2024), <http://pianckorea.org/> (Accessed: Mar. 2024).
- [8] Seong, Y. C.(2014), Assessment on Navigational Stress and Fairway' Width according to Traffic Flow, Journal of Korean Navigation and Port Research, Vol. 38, No. 3, pp. 253-259.
- [9] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan (OCDI)(2009), Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan.
- [10] US. Army Corps of Engineers(USACE)(2006), Hydraulic Design of Deep Draft Navigation Projects.
- [11] Yang, H. J., H. S. Choi, and Y. C. Seong(2012), A Study on the Determination of Route Width Considering Marine, Korean Navigation and Port Research, 2012.10a, pp. 171-173.

Received : 2024. 03. 21.

Revised : 2024. 04. 04.

Accepted : 2024. 04. 26.