



# 선박의 간섭영향을 고려한 안전통항거리에 관한 기초 연구

이 상 도\*  
(한국해양대학교)

## A Basic Study on the Distance of Safe Passing considering Ship-to-Ship Interaction

Sang-Do LEE\*  
(Korea Maritime and Ocean University)

### Abstract

For decades, prediction technique of hydrodynamic interaction between two ships in close proximity has been developed. This paper suggests the standardized distances of safe passing considering ship-to-ship interaction. In order to validate the accuracy of interaction technique of ship handling simulator, error analysis for the representative five models is conducted by comparing the calculation results of theoretical method and simulation method. With the verified ship handling simulator, simulations are widely performed to obtain interaction forces for the several major factors under three forms of hydrodynamic interaction. Using the theoretical calculation of course-keeping rudder angles, safe distances based on the panamax container ship facing various targets are researched by considering the influencing factors such as ship's speeds, length and water depth. A wide variation according to the speed is shown in case of moored passing ship. Finally, lateral distance of minimum 1 cable or  $0.6L$ (own ship's length overall) between the hulls is suggested to pass the large target(360m in length) using a rudder angle of 10 degrees for the panamax container ship of manoeuvring speeds in harbour and waterways under circumstances such as moored ship passing, head-on encountering and overtaking conditions.

**Key words :** Ship-to-ship Interaction, Distance of safe passing, Moored ship passing, Head-on encountering, overtaking, Ship handling simulator

### I. 서론

선박이 통항하는 입출항 항로, 운하, 좁은 수로에서는 한 선박이 다른 선박을 근접통과하는 상황이 발생하고 그로 인한 간섭력은 충돌의 원인이 되고 있다. 오랜 현장 경험을 가진 선박의 운항자는 선박이 근접하여 통항할 때 발생하는 간섭력을 고려하여 항해하고 있으나, 실제 현장에

적용할 수 있는 두 선박 간의 안전통항거리에 관한 정량적인 지표가 마련되지 않은 상황이다.

최근, 일본의 국토교통성(Japan's Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, MLIT)과 국제수상교통시설협회(The World Association for Waterborne Transport Infrastructure, PIANC)에서는 선박이 측벽을 통과하는 상황(ship-bank interaction), 마주치며 통과하는 상황(head-on

\* Corresponding author :  oksangdo@naver.com

encountering), 추월하는 상황(overtaking)에 발생하는 간섭력을 고려한 추가 항로폭을 선박의 종류별로 제시하고 있다(MLIT, 2009; PIANC, 2014). 그러나 특정조건하에 일반화물선을 대상으로 추정된 횡력과 회두모멘트를 모든 선박에 적용하고 있다.

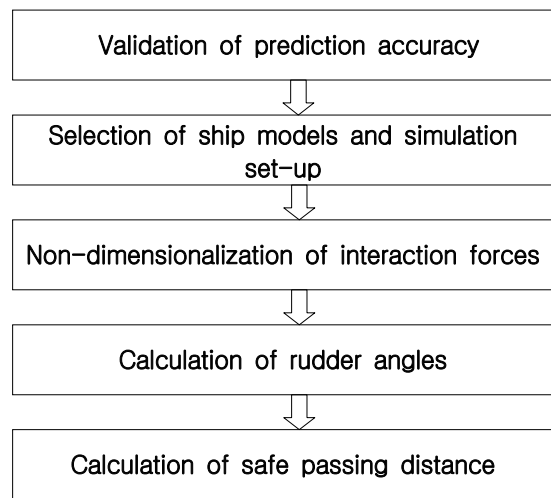
Park et al.(2010)은 선박운항자를 대상으로 설문조사를 실시하여 시계가 양호한 주간의 경우 선수전방 4.4L, 선미후방 3.1L, 정형 2.6L를 심미적 안전거리로 제시하였다. 선박 운항자의 주관적인 안전의식에 기초하여 도출한 결과로써 시계, 조류, 풍속 등의 영향을 고려하고 있으나 근접하는 상황에서 발생하는 간섭영향은 배제되어 있다. Lee & Mun(2014)는 제한수로에서 길이 200미터 이하의 동일 선박이 추월하는 경우에 간섭력은 선박의 길이비, 수심과 속력에 따라 좌우된다고 기술하였다. 또한, 후속연구에서 Lee et al.(2016)은 동일한 VLCC를 대상으로 곡선항로에서 추월하는 경우에 대한 간섭력을 연구하였는데, 간섭에 영향을 미치는 다양한 요소에 대한 연구가 보완되면 보다 유용한 지침이 될 것으로 분석된다.

본 연구에서는 항내에서 간섭력이 발생하는 여러 상황 중에 부두에 접안한 계류선을 통과하는 상황, 두 선박이 마주치며 통과하는 상황, 타 선박을 추월하는 상황을 연구 대상으로 선정하여 선박에서 운항자들이 보다 간편하게 사용할 수 있는 표준화된 안전통행거리를 도출하였다. 선박의 간섭영향을 고려한 안전통행거리를 일반화하는 것을 목적으로 먼저 선박조종시뮬레이터의 간섭력 추정 기술의 정확도를 검증하고, 검증된 선박조종시뮬레이터를 이용하여 3가지 형태의 근접 상황에서 영향요소별 간섭력을 도출하였다. 선박조종시뮬레이터로 도출한 간섭력과 MLIT의 타각계산을 이용하여 보침타각을 산정하고, 최종적으로 안전통행거리를 산출하였다.

## II. 연구 방법 및 내용

### 1. 연구 방법 및 절차

[Fig. 1]은 본 연구의 절차를 나타낸 것으로, 먼저 연구에 사용할 선박조종시뮬레이터의 간섭력 추정 기술의 정확도를 검증하였다. MLIT의 이론계산방법과 비교하여 오차를 분석하였으며, 선박조종시뮬레이터를 이용하여 선박의 간섭력을 도출하였다. MLIT에서 소개된 운동방정식을 이용하여 타각을 계산하였고, 최종적으로 각각의 간섭의 상황 및 요소별로 기준선박에 대한 안전통행거리를 산출하였다.



[Fig. 1] Research Flow

### 2. 선박조종시뮬레이터가 보유한 선박모델의 간섭력 추정에 관한 선행 연구

#### 가. 계류선을 통과하는 경우

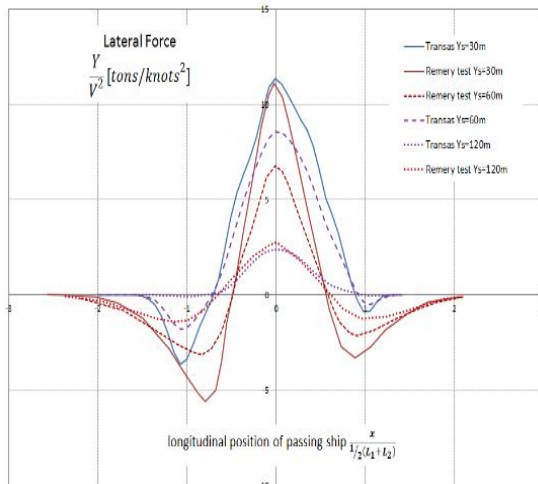
Ozersky and Rogozhina(2016)는 본 연구에 사용된 선박조종시뮬레이터의 간섭력의 정확도를 소개하였는데, <Table 1>의 모델을 대상으로 계류선을 근접통행하는 상황에서 발생하는 간섭력을 Remery(1974)의 수조실험과 비교한 결과, [Fig. 2]와 같이 두 선박 간의 수평거리의 증가에 따른 횡력의 피크값이 잘 일치하였다.

<Table 1> Main Particulars of the Ship Models (1)

Model	Ship handling simulator		Experiment (scale 1:60)	
	Moored ship	Passing ship	Moored ship	Passing ship
Type	tanker	tanker	tanker	tanker
Disp. [ton]	104,000	131,000	118,800	129,600
Lpp [m]	239	270	257	250
B [m]	44	49.9	36.8	40.4
T [m]	12.2	12.2	15.7	15.2
$h/T$	1.15	1.15	1.15	1.15
Cb	0.81	0.8	0.8	0.85

<Table 2> Main Particulars of the Ship Models (2)

Model	Ship handling simulator		Experiment	
	Container ship	Car carrier	TCH	CPT
Disp. [ton]	32921.8	68217.4	$0.96 \cdot 10^{-3}$	$1.73 \cdot 10^{-3}$
Lpp [m]	181.5	228.9	0.477	0.592
B [m]	30	36.2	-0.094	0.12
T [m]	8.5	10.88	0.0385	0.048
Speed [m/s]	8.07	9.82	0.6	0.73
$h/T$	5.87	4.59	5.97	4.79
Fn	0.19	0.21	0.28	0.3
Fh	0.36	0.44	0.4	0.48

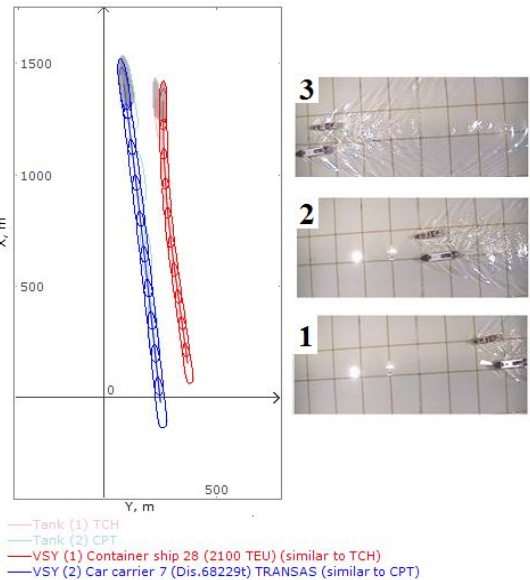


Source: Ozersky and Rogozhina, Shallow water and interaction effects in ECDIS real-time motion prediction system, 2016.

[Fig. 2] Sway Forces of Moored Ship

나. 추월하는 경우

Ozersky and Rogozhina(2016)는 <Table 2>의 모델을 대상으로 추월하는 상황에서 모델의 간섭력을 수조실험과 비교하였는데, [Fig. 3]과 같이 선박조종시뮬레이터의 컨테이너선과 카캐리어선의 궤적이 수조실험 선박의 궤적과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.



Source: Ozersky and Rogozhina, Shallow water and interaction effects in ECDIS real-time motion prediction system, 2016.

[Fig. 3] Trajectories of the Ship Models

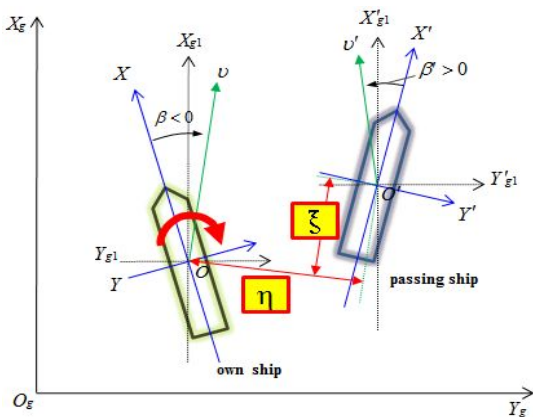
### 3. MLIT의 이론계산과 선박조종시뮬레이터를 이용한 계산방법의 비교 분석

가. 간섭력과 좌표계

본 연구에 사용된 러시아의 Transas 선박조종시물레이터는 체계적인 실험을 근거한 간섭력이 모델링되어 있고, 다양한 간섭의 상황에 대한 시물레이션이 가능하며 상대선(target ship)을 자유롭게 조종할 수 있는 장점이 있다. 간섭력의 계산은 먼저 근접하는 상대선에 의한 압력의 변화를 식 (1)과 같이 요소들의 합으로 표현하고 있다. 여기서,  $\mu$ 는 질점의 위치벡터,  $F_n$ 은 프루드수,  $S$ 는 압력장의 면적,  $n_p$ 는 프로펠러 회전수,  $H_w$ 는 수면의 압력,  $u$ 와  $v$ 와  $r$ 은 병진속도 및 회전속도 성분,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $g$ 는 중력가속도이다. 간섭력의 계산을 위해 식 (2)와 같이 자선의 구역( $Z_{own}$ )과 근접한 통과선(passing ship)의 구역( $Z_{passing}$ )의 교차지점에 대한 순환탐색(loop search)이 수행된다(Ozersky and Rogozhina, 2016).

$$H_w(\mu) = H_w(F_n, \mu) + H_w(v, r, \mu) + H_w^{wake}(u, v, r, n_p) \quad (1)$$

$$F_{HDI} = Z_{own} \cap \bigcap_i^N Z_{passing} \left[ \rho g \int_{S_i^c} (H_w(\mu_i^i)) ds \right] \quad \dots \dots (2)$$



[Fig. 4] Coordinates of Hydrodynamic Interaction

[Fig. 4]는 두 선박의 간섭력을 구하는 좌표계이다. 여기서,  $\eta$ 는 두 선박의 중심선 간의 수평거리이고,  $\xi$ 는 두 선박의 중심선 간의 종거리(stagger)이다. 식 (3)~(5)는 전후력, 횡력, 회두모멘

트를 구하는 일반적인 표현으로, '는 근접한 통과선을 의미한다.

$$X_{INT} = C_{XINT} \left[ \frac{Fn, (\eta - 0.5B - 0.5B') / (0.5B),}{\frac{2\xi}{L'}, \psi, \psi', \beta, \beta', \frac{H}{T}, \frac{V}{V'}, \frac{L'}{L}}, \right] \frac{\rho U^2}{2} LT \quad \dots (3)$$

$$Y_{INT} = C_{YINT} \left[ \frac{Fn, (\eta - 0.5B - 0.5B') / (0.5B),}{\frac{2\xi}{L'}, \psi, \psi', \beta, \beta', \frac{H}{T}, \frac{V}{V'}, \frac{L'}{L}}, \right] \frac{\rho U^2}{2} LT \quad \dots \dots (4)$$

$$N_{INT} = C_{NINT} \left[ \frac{Fn, (\eta - 0.5B - 0.5B') / (0.5B),}{\frac{2\xi}{L'}, \psi, \psi', \beta, \beta', \frac{H}{T}, \frac{V}{V'}, \frac{L'}{L}}, \right] \frac{\rho U^2}{2} L^2 T \quad \dots (5)$$

나. 비교 대상선박의 제원

선박조종시물레이터를 사용한 계산방법과 MLIT의 이론계산의 정확도를 비교하기 위하여, 선박의 종류별로 유사한 크기의 대상선박을 <Table 3>과 같이 선정하였다. 컨테이너선 2척, 파나막스급 벌크선, 카캐리어선, LNG선 등 총 5척의 선박모델을 선정하여 2가지 근접상황에 대한 두 방법의 결과를 비교하고자 한다. CT는 MLIT에서 소개된 이론계산이고, CS는 선박조종시물레이터를 이용하여 계산한 방법이다.

<Table 3> Comparison of Calculation Methods

Ship Type	Calculation Method	LOA [m]	Breadth [m]	Draft [m]
Container ship (over Panamax)	CT	299.9	40	14
	CS	299	37.1	13
Container ship (Panamax)	CT	288.3	32.2	13.3
	CS	289	32.2	12
Bulk carrier (Panamax)	CT	225	32.3	13.5
	CS	230	32	12
Car carrier	CT	199.9	32.2	10.1
	CS	199.1	32.26	11.02
LNG carrier	CT	283	44.8	10.8
	CS	290	44.7	11.9

CT: Calculation method based on the theory of MLIT, CS: Calculation method based on the ship handling simulator

다. 대상선박의 유체력 계수

<Table 4>는 MLIT의 이론계산에 사용된 선박의 유체력 계수를 나타내고 있다(MLIT, 2009). 여기서,  $N'_\delta$ 는 타각이  $\delta$ 의 각도에 위치하였을 때 타로부터 발생하는 타력모멘트계수  $N'_\delta$ 의 무차원수이다.

<Table 4> Hydrodynamic Coefficients

Ship Type	$N'_\delta$
Container ship (over Panamax)	0.0360
Container ship (Panamax)	0.0391
Bulk carrier (Panamax)	0.0348
Car carrier	0.0365
LNG carrier	0.0381

Source: Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism(MLIT), Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan, 2009.

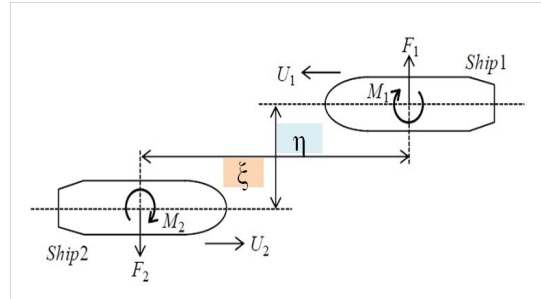
라. 타각산정 방법

[Fig. 5]의 좌표계에서 (a)는 두 선박이 정면으로 마주치는 경우이며 (b)는 선박을 추월하는 경우로서, 식 (6)과 같이 평형상태의 운동방정식으로 나타낼 수 있다. 마주치는 경우와 추월하는 경우는 선박이 측벽을 통과하는 경우와 달리 표류각을 0으로 하고, 식 (7)을 이용하여 타각을 산정할 수 있다(Andou et al., 2012). 이 타각은 선박이 타선박이나 측벽으로 인한 간섭의 영향으로 회두모멘트가 발생했을 때 정침이 가능한(course-keeping) 보침타각을 의미한다.

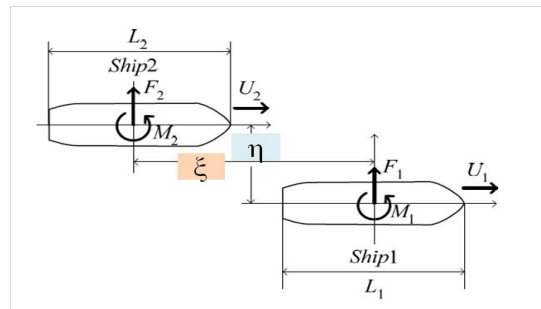
$$-C_{NINT} + N'_\delta \delta = 0 \dots\dots\dots (6)$$

$$\delta = \frac{C_{NINT}}{N'_\delta} \dots\dots\dots (7)$$

$\delta$  : 타각(rad),  $C_{NINT}$  : 회두모멘트



(a) Head-on Encountering



(b) Overtaking

Source: Andou et al., A calculation of the parameters for planning of the width of fairway for very larger vessels, 2012.

[Fig. 5] Coordinates of Ship-to-Ship Interaction

마. 타각계산 결과

MLIT의 이론계산에서는 타각 15도와 5도에 해당하는 두 선박 간의 수평거리를 산출하였다. 간편한 식 (7)을 이용하여 간섭력으로 인한 회두모멘트와 타력모멘트계수의 무차원값으로 보침타각을 구한다. [Fig. 5]의 (a)에서 두 선박의 중심선 간의 수평거리와 선박의 수선간장의 비( $\eta/L$ ) 0.5~0.7에 해당하는 회두모멘트의 피크값에 해당하는 타각을 <Table 5>와 [Fig. 6]의 (a)에 나타내었다. 또한, 타각 15도에 해당하는  $\eta/L$ 의 값은 <Table 7>에서 이론계산의 결과와 시뮬레이터를 이용한 결과를 비교하였다. 동일한 방법으로 추월하는 경우에 대해 실시하여 <Table 6>과 [Fig. 6]의 (b)에 나타내었다. 추월하는 경우는 타각 5도

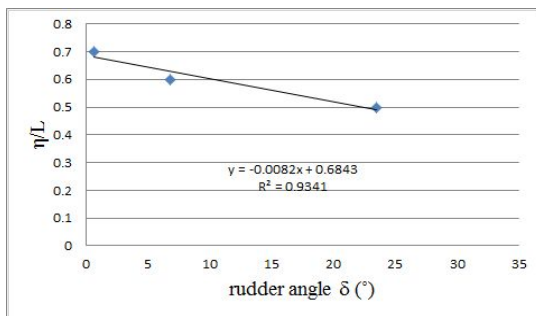
에 해당하는  $\eta/L$ 의 값을 <Table 9>에서 비교하였다.

<Table 5> Rudder Angles in Head-on Encountering

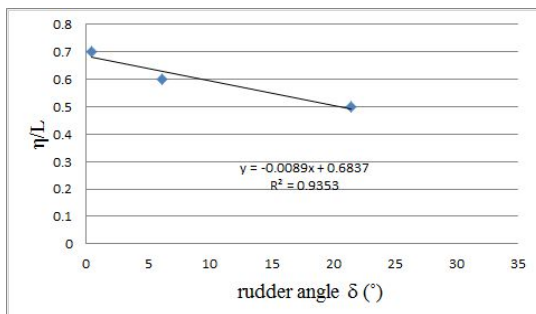
Container ship (over Panamax)	$\eta/L$		
	0.5	0.6	0.7
$C_{NINT}(\max)$	0.0148	0.0043	0.0004
$N'_\delta$	0.036	0.036	0.036
Rudder angle(degree)	23.52	6.82	0.64

<Table 6> Rudder Angles in Overtaking

Container ship (over Panamax)	$\eta/L$		
	0.5	0.6	0.7
$C_{NINT}(\max)$	0.0135	0.0039	0.00031
$N'_\delta$	0.036	0.036	0.036
Rudder angle (degree)	21.49	6.21	0.49



(a) Head-on Encountering



(b) Overtaking

[Fig. 6] Rudder Angles of Course-keeping

바. 오차 분석

앞서 계산한 각 상황별 보침타각에 해당하는  $\eta/L$  값을 <Table 7>과 <Table 9>에 나타내었다. 마주치는 경우는  $h/T=1.3$ 과 보침타각 15도, 추월하는 경우는  $h/T=1.2$ 와 보침타각 5도의 조건에 해당하는 값이다. <Table 7>과 <Table 9>에서  $S$ 는 두 선박의 외판(hull)간의 수평거리를 미터로 표시한 것으로 식 (8)과 같이 구할 수 있다(Andou et al., 2012).

$$S = \eta - \left( \frac{B_1 + B_2}{2} \right) \dots\dots\dots (8)$$

<Table 8>과 <Table 10>은 각 상황에 대한 이론계산 결과와 시뮬레이션을 이용한 계산 결과의 오차를 비교한 것이다. 5종류의 선박을 대상으로 마주치는 경우는  $h/T=1.3$ 과 보침타각 15도의 조건에서 계산한 결과 평균 7.39%의 오차를 보였고, 추월하는 경우는  $h/T=1.2$ 과 보침타각 5도의 조건에서 평균 9.47%의 오차를 보였다.

<Table 7> Results of Calculation (Head-on)

Ship Type	$\eta/L$		$S$ [m]	
	CT	CS	CT	CS
Container (over Panamax)	0.511	0.561	105	112.2
Container (Panamax)	0.498	0.545	103.6	109.3
Bulk carrier (Panamax)	0.516	0.531	79	74.1
Car carrier	0.51	0.597	64.6	70.5
LNG carrier	0.502	0.573	90.7	99.1

$S$ : Separation between two ship's hull

이와 같이 검증된 선박조종시뮬레이터는 다양한 선박과 요소를 입력할 수 있는 장점이 있으므로 크기와 종류가 다른 다양한 상대선박을 근접하여 통항하는 기준선박에 대한 안전통항거리를 영향요소별로 도출하고자 한다.

<Table 8> Error Analysis (Head-on)

Condition	$h/T=1.3, \delta=15^\circ$		
	CT (A)	CS (B)	$(A-B/A) \times 100$ = Error (%)
Container (over Panamax)	105	112.2	6.86
Container (Panamax)	103.6	109.3	5.50
Bulk carrier (Panamax)	79	74.1	6.20
Car carrier	64.6	70.5	9.13
LNG carrier	90.7	99.1	9.26
Average error			7.39

$h$ : water depth,  $T$ : draft of ship,  $\delta$ : rudder angle of course keeping

<Table 9> Results of Calculation (Overtaking)

Ship Type	$\eta/L$		$S$ [m]	
	CT	CS	CT	CS
Container (over Panamax)	0.74	0.64	169.1	154.0
Container (Panamax)	0.72	0.64	163.2	153.0
Bulk carrier (Panamax)	0.74	0.61	128.4	108.3
Car carrier	0.73	0.64	106.9	95.8
LNG carrier	0.72	0.64	150.1	140.8

$S$ : Separation between two ship's hull

<Table 10> Error Analysis (Overtaking)

Condition	$h/T=1.2, \delta=5^\circ$		
	CT (A)	CS (B)	$(A-B/A) \times 100$ = Error (%)
Container (over Panamax)	169.1	154.0	8.92
Container (Panamax)	163.1	153.0	6.18
Bulk carrier (Panamax)	128.4	108.3	15.65
Car carrier	106.9	95.8	10.42
LNG carrier	150.1	140.8	6.17
Average error			9.47

$h$ : water depth,  $T$ : draft of ship,  $\delta$ : rudder angle of course keeping

### Ⅲ. 상황별 안전통항거리 표준화

#### 1. 대상선박 선정 및 실험조건 설정

##### 가. 대상선박 선정

<Table 11>과 <Table 12>은 자선(own ship)인 파나막스급 컨테이너선과 다양한 종류의 상대선(target ship)의 체원이다. 자선의 흘수가 상대선의 흘수보다 큰 경우( $T_1 > T_2$ )와 작은 경우( $T_1 < T_2$ )에 자선과 타선의 길이비( $L_1/L_2$ )의 범위를 각각 0.7~3.2인 경우와 0.7~1.2인 선박을 선정하였다. 이같이 상대선박을 분류한 이유는 해역의 수심과 흘수의 비( $h/T$ )를 기준이 되는 파나막스급 컨테이너선으로 설정하기 위해서이다.

##### 나. 실험조건 설정

근접하는 두 선박의 간섭이 발생하는 3가지 상황은 [Fig. 7]과 같이 부두에 접안한 계류선을 통과하는 경우, 두 선박이 마주치며 통과하는 경우, 타 선박을 추월하는 경우로 구성하였다. 이와 같은 3가지 상황에서 근접한 상대선박으로 인해 자선에 회두모멘트가 발생하였을 때, 자선을 10도로 정침이 가능한 두 선박의 외판간의 수평거리를 안전통항거리로 산출하였다. 공통적으로  $\eta$ 는 두 선박의 중심선 간의 수평거리이며,  $\xi$ 는 두 선박의 중심선 간의 종거리이고, 안전통항거리를 의미하는  $S$ 는 식 (8)과 같이 계산하였다.

[Fig. 7]의 (a)는 자선인 파나막스급 컨테이너선이 7knots, 9knots, 12knots로 상대선인 계류선의 우측을 053.5°로 통과하는 것을 나타내고 있다. [Fig. 7]의 (b)는 두 선박이 정면으로 마주치며 통과하는 모습인데, 000°를 향하고 있는 자선의 속력( $V_1$ )은 10knots, 12knots, 14knots이며, 180°를 향하는 상대선의 속력( $V_2$ )은 7knots, 10knots, 12.6knots로 하여 자선과 상대선의 속력비( $V_2/V_1$ )를 0.7~0.9로 지정하였다. [Fig. 7]의 (c)는 자선이 상대선의 좌현을 추월하는 모습으로 왼쪽에 위치

이 상 도

<Table 11> Main Particulars of the Ship Models (3)

Designation	Own ship( $L_1$ )	Target ships( $L_2$ )						
		$(0.7 < L_1/L_2 < 1.5, T_1 > T_2)$						
Type	Container ship(P.)	Container ship(O.P.)	LNG	Passenger cruise ship	LNG	Oil tanker	Bulk carrier(P.)	Car carrier
$L_1/L_2$	-	0.76	0.80	0.83	1.00	1.19	1.26	1.45
Disp. [ton]	66,700	166,397	171,300	71,222	110,710	67,850	69,580	39,282
DWT [ton]	59,500	153,500	125,700	11020	72,300	59,708	50,100	-100
$L_{OA}$ [m]	289	382	360	350	289.9	242.8	230	199.1
Lpp [m]	273	366	346	315	276	228	218	189.9
$B$ [m]	32.2	54.2	55	38	44.7	32.2	32	32.26
$T$ [m]	12	11	12	8.5	11.9	11	12	11.02

Disp.= Displacement,  $B$ = breadth,  $T$ = draft,

P.= Panamax, O.P. = Over Panamax

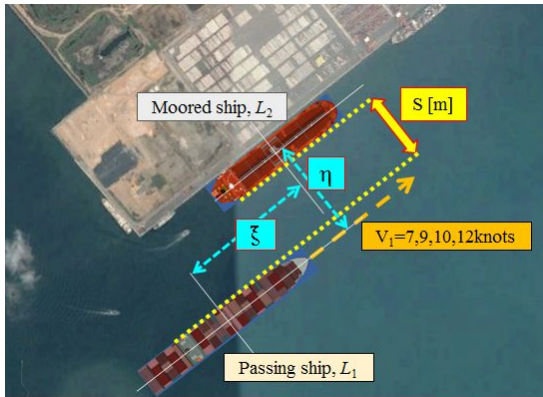
<Table 12> Main Particulars of the Ship Models (4)

Designation	Target ships( $L_2$ )				$0.7 < L_1/L_2 < 1.2, T_1 < T_2$				
	$(1.6 < L_1/L_2 < 3.2, T_1 > T_2)$								
Type	Passenger car ferry	Integrated tug barge	Ro-Ro passenger ferry	Fishery training ship	Container ship(O.P.)			VLCC Suezmax	VLCC Aframax
$L_1/L_2$	1.65	2.02	2.31	3.11	0.73	0.76	0.83	1.03	1.16
Disp. [ton]	20,300	19,960	6,110	3,300	211,405	188,280	144,500	189,406	125,537
DWT [ton]	3,832	16,459.9	1,204.5	-100	198,000	153,500	131,938	163,545	106,896
$L_{OA}$ [m]	175.4	142.8	125	93	397.7	382	347	280.5	249.9
Lpp [m]	154.2	138.82	107	83	376	366	331	270	239
$B$ [m]	31.5	30.33	18.25	14.9	56.4	54.2	45.2	50	44
$T$ [m]	6.65	6.06	5.25	5.22	15.2	15	13.5	16.62	14.4

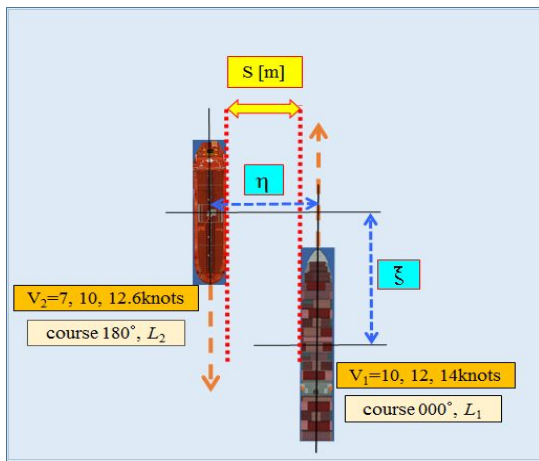
Disp.= Displacement,  $B$ = breadth,  $T$ = draft,

O.P. = Over Panamax

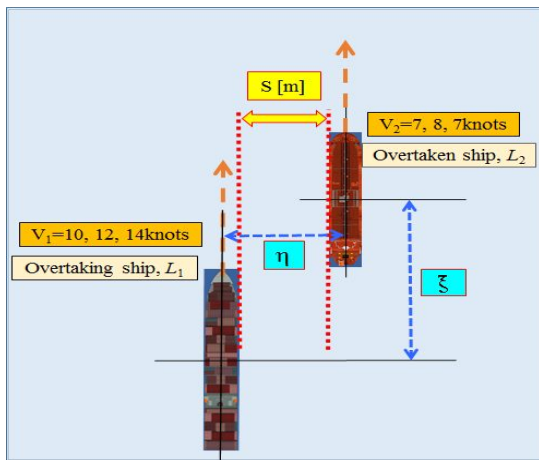




(a) Moored Ship Passing



(b) Head-on Encountering



(c) Overtaking

[Fig. 7] Conditions of Ship-to-Ship Interaction

한 추월선의 속력( $V_1$ )은 10knots, 12knots, 14knots이며, 오른쪽에 위치한 피추월선의 속력( $V_2$ )은 7knots, 8knots, 7knots로 하여 추월선과 피추월선의 속력비( $V_2/V_1$ )를 0.5~0.7로 구성하였다. 선박의 속력은 국내 항만의 접이안 속력과 제한속력을 고려하였다(Kim et al., 2012).

수심별 영향을 분석하기 위해서는 파나마급 컨테이너선과 상대적으로 큰 LNG선을 대상으로 3가지 형태의 근접상황에서  $h/T=1.1\sim 5.0$ 의 범위로 실시하였다. 마지막으로, 선박의 길이별 영향을 분석하기 위해서 기준선인 파나마급 컨테이너선보다 크고 작은 선박들 중에서 자선보다 흘수가 작은 경우( $T_1 > T_2$ )와 큰 경우( $T_1 < T_2$ )로 분류하여 상대적으로 흘수가 큰 VLCC와 같은 상대선을 고려한 안전통항거리도 도출하였다.

다. 무차원계수

두 선박의 중심선 간의 종거리(stagger,  $\xi$ )는 식 (9)와 같이 무차원화하였다(Falter, 2010). 여기서  $L_1$ 은 자선의 전장( $L_{OA}$ )이며,  $L_2$ 는 상대선의 전장이다. 선박조종시뮬레이터를 이용하여 도출한 두 선박의 간섭력인 횡력( $Y_{INT}$ )과 회두모멘트( $N_{INT}$ )는 각각 식 (10)과 같이 무차원화하였다.

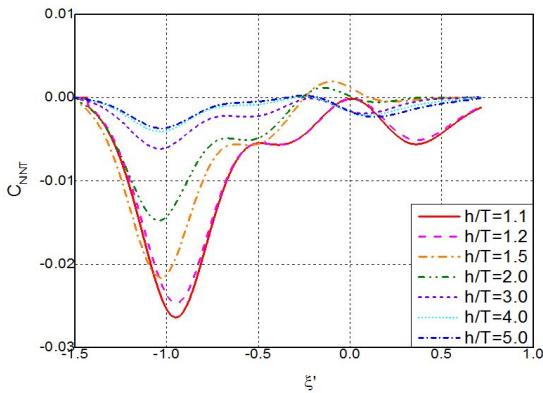
$$\xi' = \frac{2\xi}{L_1 + L_2} \dots\dots\dots (9)$$

$$C_{Y_{INT}} = \frac{Y_{INT}}{\frac{1}{2}\rho U^2 L T}, \quad C_{N_{INT}} = \frac{N_{INT}}{\frac{1}{2}\rho U^2 L^2 T} \dots\dots (10)$$

## 2. 선박조종시뮬레이터를 이용한 간섭력 도출

[Fig. 8]은 추월선인 파나마급 컨테이너선이 12knots로 8knots의 LNG선(피추월선)을 추월 통과시에 추월선에 작용하는 회두모멘트를 무차원화하여 수심별로 도시한 것이다. 추월선의 중심선과 피추월선의 중심선 간의 수평거리( $\eta$ )를  $0.4L$ 인 경우만을 수심별로 비교하였다. 추월 초기에 최대 회두모멘트가 발생하는 지점( $\xi'=-1.0$ )을 비교하면,

$h/T=1.1$ 일 때의 최대회두모멘트는  $h/T=5.0$ 인 경우에 비해 7배 크게 나타났다. 또한,  $h/T=2.0$ 일 때의 최대회두모멘트는  $h/T=5.0$ 인 경우보다 약 4배 크게 나타났다. 계류선을 통과하는 상황과 마주치는 상황 및 종력, 횡력의 경우는 지면관계상 생략하였다.



[Fig. 8] Yaw Moments according to the Depth

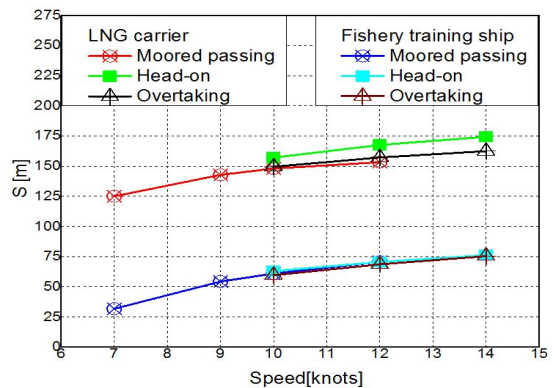
### 3. 간섭의 상황 및 요소별 안전통항거리

#### 가. 속력별 안전통항거리

[Fig. 9]는  $h/T=1.2$ 에서 LNG선과 어업실습선을 근접통항하는 파나막스급 컨테이너선의 속력별 안전통항거리를 나타낸 것이다. 상대선인 LNG선과 어업실습선의 전장은 약 3.9배 차이가 난다.

컨테이너선이 계류선인 LNG선을 통과할 때의 안전통항거리는 어업실습선을 통과하는 경우에 비해 각각 3.9배(7knots), 2.6배(9knots), 2.2배(12knots) 높게 나타났다. 10knots의 컨테이너선이 7knots의 LNG선을 정면으로 마주치는 경우 ( $V_2/V_1=0.7$ )의 안전통항거리는  $4.9B_1$ 이고, 상대선이 어업실습선일 때는  $2.0B_1$ 으로 도출되었다. 14knots의 컨테이너선이 7knots의 LNG선을 추월하는 경우( $V_2/V_1=0.5$ )의 안전통항거리는  $5.0B_1$ 이고 어업실습선인 경우에는  $2.3B_1$ 으로 약 2.2배 차이를 보였다.

항내에서 9~10knots로 운항하는 파나막스급 컨테이너선의 안전통항거리는 상대선의 크기에 따라 약  $2\sim 5B_1$ (컨테이너선의 폭)에 해당한다. 또한, [Fig. 9]에서 보는 바와 같이 근접상황 중에서 계류선 통과시가 속력에 따른 변화의 폭이 컸으며, 속력이 2knots 증가시 상대선이 대형선인 경우에는 5~10% 증가하였고, 상대선이 소형선인 경우에는 10%이상 증가하였다. 전반적으로 통과속력이 증가할수록 안전통항거리는 조금씩 증가하였다.



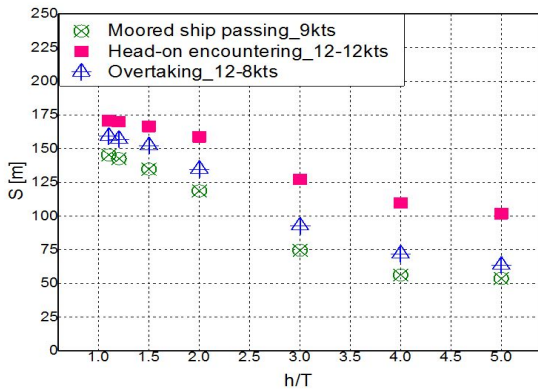
[Fig. 9] Safe Distances according to the Speed

#### 나. 수심별 안전통항거리

수심의 차이에 따른 간섭의 상황별 안전통항거리를 산출하여 [Fig. 10]에 도시하였다. 그림에서 x축은 자선인 파나막스급 컨테이너선에 대한 수심과 흘수의 비( $h/T_1$ )이며, y축은 안전통항거리이다. 상대선은 자선보다 큰 LNG선으로 하였고, LNG선과의 간섭영향으로 자선에 회두모멘트가 발생했을 때 타각 10도로 정침이 가능한 안전통항거리를 도출하였다. 계류선을 통과하는 통과선의 속력은 9knots이고, 마주치며 통과하는 두 선박의 속력은 12knots이며, 추월선과 피추월선의 속력은 각각 12knots와 8knots로 정하였다.

수심이  $h/T=5.0$ 에서 1.1로 감소할 때, 컨테이너선의 안전통항거리는 계류선 통과시는 2.7배, 마주치며 통과시는 1.7배, 추월 통과시는 2.5배 증가하였다. 수심 구간을 보면,  $h/T=1.1\sim 1.5$  구간

에서는 변화의 폭이 작고,  $h/T=2.0\sim 4.0$  구간에서는 1.4~2.1배의 차이로 변화의 폭이 크게 나타났다. 전반적으로 수심이 증가하면, 안전통항거리는 감소하였으며, 상대선이 자선보다 큰 대형선인 경우에는 계류선 통과시와 추월 통과시가 마주치며 통과시에 비해 수심의 변화에 민감한 것을 알 수 있다.

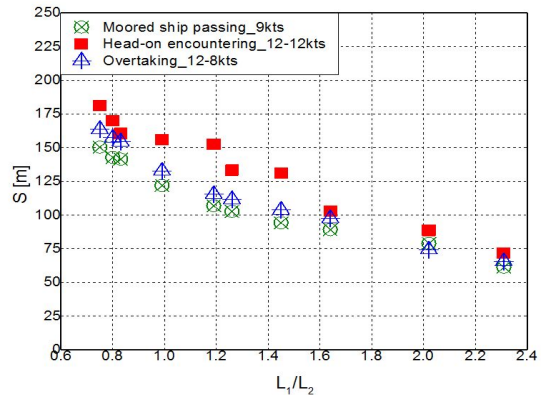


[Fig. 10] Safe Distances according to the Depth

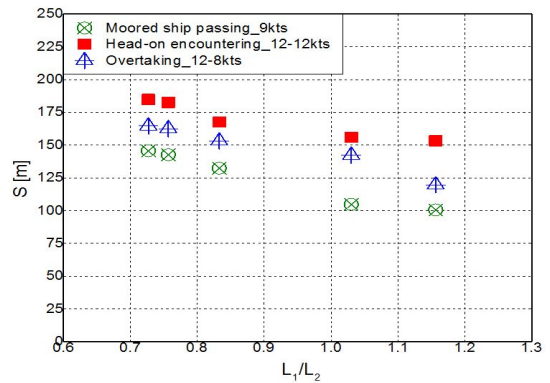
다. 길이별 안전통항거리

[Fig. 11]은 자선과 상대선의 길이비에 따른 간섭의 상황별 안전통항거리를 도시한 것이다. 대상해역의 수심은 자선의 기준으로  $h/T_1=1.2$ 인 경우와 상대선의 기준으로  $h/T_2=1.2$ 인 경우로 분류하였다. [Fig. 11]의 (a)는 상대선이 파나막스급 컨테이너선보다 흘수가 작은 경우( $T_1 > T_2$ )이며, (b)는 초대형 컨테이너선이나 VLCC 등 상대적으로 흘수가 깊은 선박인 경우( $T_1 < T_2$ )이다. [Fig. 11]의 (b)에서 흘수가 깊은 선박에 대한 파나막스급 컨테이너선의 안전통항거리는 (a)에서 자선과 상대선의 길이비가  $0.7 < L_1/L_2 < 1.2$ 인 구간의 선박을 근접통항하는 경우와 비슷한 값을 보이는 것을 알 수 있다. [Fig. 11]에서 보는 바와 같이 수심 구간  $h/T=1.1\sim 1.5$  구간에서는 안전통항거리의 차이가 크게 나타나지 않았기 때문이다. 전반적으로 자선과 상대선의 길이비가 증가할수록, 즉 크기가 작은 선박을 근접통항하는 경우에 각각의 간섭의

상황에서 자선의 안전통항거리는 줄어드는 것을 확인하였다. Lee et al.(2016)은 추월 통과시에  $h/T=1.2$ 에서 동일한 VLCC의 중심선 간의 수평거리( $\eta$ )가  $0.6L_1$  이상이면, 간섭력은 급격히 줄어든다고 기술한 바가 있다.



(a) ( $h/T_1=1.2, T_1 > T_2$ )



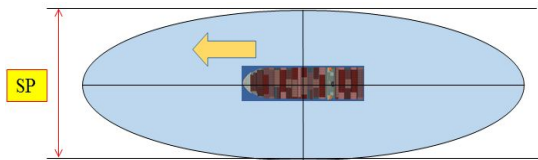
(b) ( $h/T_1=1.2, T_1 < T_2$ )

[Fig. 11] Safe Distances according to the Length

#### 4. 안전통항거리 결과 비교 분석

[Fig. 12]는 안전통항을 위해 필요로 하는 횡방향의 이격거리를 의미하는 SP영역을 도시한 것이다. <Table 13>은 항내 제한수로에서 SP영역에 대한 최소안전거리를 제시한 선행연구로서 Inoue(2011)는 설문조사를 통해 심미적 안전거리를 설명하였고, Fujii & Mizuki(1998)는  $1.6L_m$ 의

범퍼모델을 제시하였다. 여기서,  $L_m$ 은 두 선박의 평균길이이다. <Table 14>는 제한수로에서 다른 종류의 상대선을 근접통항하는 파나막스급 컨테이너선의 안전통항거리(선체외판 간의 수평거리)를 비교분석한 것이다. 본 연구에서 선박조종시물레이터를 이용하여 계산한 3가지 형태의 근접상황에 대한 결과는 기존의 연구인 Inoue(2011)와 Fujii & Mizuki(1998)의 식에 비해 선박의 종류별로 약 1/3에 해당하는 것을 알 수 있다. 선박의 간섭영향을 고려하여 상대선이 대형선인 경우에  $0.5\sim 0.6L_1$ , 중형선(파나막스급 벌크선)은  $0.4\sim 0.5L_1$ , 소형선(배수톤수 3~5천 톤)의 경우는  $0.2L_1$ 이상이 요구된다.



[Fig. 12] Sufficient Distance of Safe Passing(SP)

<Table 13> Previous Results of SP in Port

Condition : confined waterway(in port)		
	Inoue(2011)	Fujii(1998)
Lateral direction (SP)	$(0.008L_2 + 0.667)L_1$	$1.6L_m$

<Table 14> Safe Distances of Container Ship

Own ship : container ship(Panamax, $L_1=289m$ )			
Target ships ( $L_2$ )	Lee (simulator)	Inoue (questionnaire)	Fujii (bumper)
LNG carrier ( $L_2=360m$ )	$0.5\sim 0.6L_1$	$1.7L_1$ (496.4m)	$1.8L_1$ (519.2m)
Bulk carrier (Panamax, $L_2=230m$ )	$0.4\sim 0.5L_1$	$1.2L_1$ (346.2m)	$1.4L_1$ (415.2m)
Fishery training ship( $L_2=93m$ )	$0.2L_1$	$0.6L_1$ (187.8m)	$1.1L_1$ (305.6m)

## IV. 결론

항내 간섭력이 발생하는 3가지 형태의 근접상황에서 파나막스급 컨테이너선의 안전통항거리(선체외판 간의 수평거리)를 영향요소별로 도출하였다.

1) 속력이 2knots 증가시 안전통항거리는 상대선이 대형선인 경우에는 5~10% 증가한 반면에, 상대선이 소형선인 경우에는 10%이상 증가하였다. 계류선 통과시가 속력에 따른 변화의 폭이 크게 나타났다.

2) 수심에 따른 안전통항거리는  $h/T=1.0\sim 2.0$ 의 구간보다  $h/T=2.0\sim 4.0$ 의 구간에서 변화의 폭이 1.4~2.1배 정도 크게 나타났다.

3) 선박의 길이에 따른 파나막스급 컨테이너선의 안전통항거리는 상대선이 대형선의 경우  $0.5\sim 0.6L_1$ (자선의 전장), 중형선(파나막스급 벌크선)의 경우는  $0.4\sim 0.5L_1$ , 소형선(배수톤수 3~5천 톤)의 경우는  $0.2L_1$ 이상으로 도출되었다.

4) 최종적으로 해역의 수심  $h/T_1=1.2$ 에서 항내 제한속력으로 통항하는 파나막스급 컨테이너선은 계류선 통과시, 마주치며 통과시, 추월 통과시에 발생하는 간섭력을 타각 10도로 제어하여 정침할 수 있는 최소 1 cable, 약  $0.6L_1$ 의 안전통항거리가 요구된다.

본 연구는 파나막스급 컨테이너선에 대한 안전통항거리만을 제시한 점과 보침타각을 계산하여 사용한 한계가 있었다. 향후 VLCC나 여객선 등을 기준선박으로 하여 간섭력에 의한 실제타각을 고려한 연구나 영향요소별 안전통항거리와 최단 정지거리 등을 동시에 계산하여 비교분석하는 후속연구도 필요하겠다.

## References

Andou, K. · Akakura, Y. & Abe, M.(2012). A Calculation of the Parameters for Planning of the

- Width of Fairway for Very Large Vessels, Technical Note of National Institute for Land and Infrastructure Management 696, 1~30.
- Falter, J.(2010). Validation of a Potential Flow Code for Computation of Ship-Ship Interaction Forces with Captive Model Test Results, Ghent University, Master Dissertation.
- Fujii, Y & Mizuki, N.(1998). Design of VTS Systems for Water with Bridges, Proceedings of the International Symposium on Advances in Ship Collision Analysis, 177~190.
- Inoue, K.(2011). Theory and Practice of Ship Handling, Sanghakdang, 223-226.
- Kim, Deug-Bong · Yun, Byeong-Won · Jeong, Jae-Yong · Park, Jin-Soo & Park, Young-Soo(2012). A Fundamental Study on the Improvements for Speed Limit at the Ports and Fairways in Korea, Journal of the Korean Society of the Marine Environments & Safety 18(5), 423~430.
- Lee, Chun-Ki & Moon, Serng-Bae(2014). A Study on the Minimum Safe Distance between Two Vessels in Confined Waters, Journal of Korean Navigation and Port Research 38(6), 561~565.
- Lee, Chun-Ki · Moon, Serng-Bae & Jeong, Tae-Gweon(2016). The Investigation of Ship Maneuvering with Hydrodynamic Effects between Ships in Curved Narrow Channel, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 8, 102~109.
- MLIT(2009). Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan, Japan's Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, 568~574.
- Ozersky, A. & Rogozhina, E.(2016). Shallow Water and Interaction Effects in ECDIS Real-time Motion Prediction, Proceedings of the 4th International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water, Hamburg, Germany, 186~196.
- Park, Young-Soo. · Jeong, Jae-Young & Kim, Jong-Sung(2010). A Study on the Minimum Safety Distance between Navigation Vessels based on Vessel Operator's Safety Consciousness, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety 16(4), 401~406.
- PIANC(2014). Harbour Approach Channels Design Guidelines, The World Association for Waterborne Transport Infrastructure, 283~287.
- Remery, G.(1974). Mooring Forces Induced by Passing Ships, Proceedings of the 6th Annual Offshore Technology Conference, Houston, USA, 349~358.
- 
- Received : 22 May, 2017
  - Revised : 08 April, 2017
  - Accepted : 20 April, 2017