

소형 고속정의 운항한계에 대한 연구

배준영**

* 동주대학교 조선해양과

A Study on Operating Limit Analysis for Small High-speed Boat

Jun-Young BAE**

* Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, DongJu College, Busan 49318, Korea

요 약 : 본 연구는 소형 고속정의 운항한계를 검토하기 위하여 수행되었다. 일반적으로 내항성능의 검토는 선형의 결정 단계 전에 이루어지지만 본 연구는 선박의 건조가 완료된 후에 이루어졌다. 검토 결과, 종동요, 수직 및 수평가속도, 슬래밍의 운동성능은 특정한 조우각을 제외하고는 만족하였으나 갑판침수의 경우에는 해석을 수행한 모든 조건에서 만족하지 않았다. 이것은 대상선박의 크기가 소형이기 때문에 선박의 속도나 파도와와의 조우각보다는 해상상태가 설정한 내항성능 기준의 만족 여부에 더 큰 영향을 미쳤기 때문으로 보인다.

핵심용어 : 소형 고속정, 운항한계, 내항성능, 조우각, 해상상태

Abstract : It was carried out a review of operating limit analysis for small high-speed boat by author. In general, a review of ship's seakeeping performance is performed in the step of ship design, but this study was carried out in the state of completion of boat. Motion performance of Pitch, Vertical and Lateral acceleration and Slamming were satisfied in some encounter angle but deck wetness was not satisfied in all it does the analysis. As a result, sea state rather than the speed and encounter angle of vessel have a greater effect on the seakeeping performance of target vessel. It seems to be due to the size of the target ship.

Key Words : Small High-speed boat, Operating limit, Seakeeping performance, Encounter angle, Sea state

1. 서 론

최근 우리나라 연안 해역에서 중국어선의 불법 조업은 급증하고 있으며 그 양상도 더욱더 폭력화 및 조직화되어가고 있다(Lim, 2014). 또한 동절기에는 계절적 영향으로 바람이 많이 불며, 이에 의한 영향으로 파도가 높게 일어나서 해양사고가 발생될 확률이 높아진다. 따라서 최근 해안경비안전본부에서는 이러한 위험 요인을 제거하고자 많은 수의 소형 고속정을 발주하고 있다.

외력에 의한 선박의 동요는 승선감과 직결되어 있으며, 또한 선박에 탑재된 각종 장비의 성능을 떨어뜨리는 요인이 될 수도 있다(Lee, 2015). 선수부에서는 종동요에 의한 슬래밍(slamming), 갑판침수(deck wetness)가 발생할 수도 있으며, 액체 탱크에는 슬로싱(sloshing) 현상도 발생하게 되어 구조적

손상을 유발하기도 한다(Ahn, 2013). 또한 반복적인 파랑 외력에 의해 발생하는 반복 변형이 특정부위에 구조적 피로(fatigue)를 누적시켜 구조적 파단이 발생할 수도 있다.

따라서 파도에 의해 선박이 받게 되는 힘에 의해 야기되는 선박의 동요를 정량적으로 예측하는 기술이 필요하게 된다. 이렇게 파랑 중 선박의 성능을 해석하고 평가하여 안전항해, 우수한 작업성, 쾌적한 승선감, 구조 안전성 등을 확보하기 위한 내항성능(seakeeping performance)의 검토가 이루어진다.

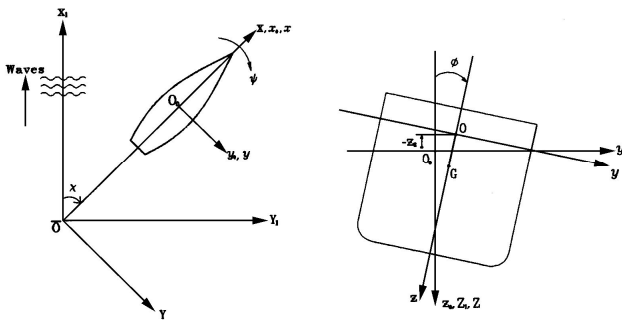
일반적으로 내항성능에 대한 연구는 선박의 선형 결정이 이루어지기 전에 수행되지만 본 연구는 선박의 건조가 완료된 상태에서 대상선박의 운항한계를 설정하기 위한 목적으로 수행되었다. 먼저 규칙파 및 불규칙파에서 대상선박의 운동 응답을 시계열을 변화시켜가면서 해석하고, 설정된 내항성능 평가 기준과 비교하여 선박의 내항성능을 항목별로 평가하여 선박의 운항 한계를 검토하였다.

† newthousands@gmail.com, 051-200-1556

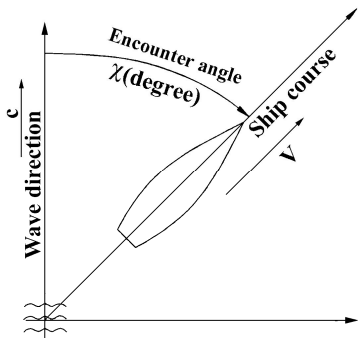
2. 수학모형

2.1 좌표계

대상선박의 운동해석을 위하여 Fig. 1과 같이 공간고정좌표계 $\bar{O}-X_1Y_1Z_1$ 을 취하고, 2차원 규칙파는 $\bar{O}X_1$ 축 방향으로 진행하는 것으로 한다. 선체의 평균 진행 방향은 $\bar{O}X$ 축으로 정의하고, 새로운 공간고정좌표계 $\bar{O}-XYZ$ 를 취한다. 그리고 $\bar{O}X$ 축 방향에는 선체의 평균 진행 속도(V)로 이동하는 등속 이동 공간좌표계 $O-x_0y_0z_0$ 를 생각하고, O_0 는 정지 수면과 일치시킨다. 그리고 선체고정좌표계 $O-xyz$ 를 취하고, O 는 무게중심 G 의 바로 위(直上)에 위치하도록 하며, 선체가 운동하고 있지 아니할 때의 O_0 와 일치시킨다. 무게중심 G 는 수선면 아래에 있는 것으로 생각한다. 파랑중 선체운동은 등속 이동 공간좌표계 $O_0-x_0y_0z_0$ 에 대해서 정의되며, 평균 위치 O_0 로부터 각 축 방향 및 각 축 주위로 미소 진폭의 동요($x_G, y_G, z_G, \phi, \theta, \psi$)를 하고 있는 것으로 생각한다. 2차원 규칙파의 진행 방향(파속 : c)과 선박의 항행 방향이 이루는 각을 조우각(encounter angle) χ 라 정의한다.



(a) Coordinate system



(b) Encounter angle

Fig. 1. Coordinate system and encounter angle.

2.2 선체운동방정식

2.2.1 규칙파에서의 선체운동방정식

선체의 운동방정식은 운동응답이 선형이며 조화적이라는 가정하에 여섯 개의 선형 연성 미분 운동방정식(linear coupled differential equation of motion)으로 이루어진다. 하지만 선박과 같이 횡대칭 세장체(long slender hull form)의 경우에는 전후동요(surge)의 유체동역학적 힘이 다른 힘들보다 훨씬 작기 때문에 종방향의 운동은 무시하고 운동방정식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sum_{j=2}^6 \{ (M_{jk} + A_{jk}) \ddot{\eta}_k + B_{jk} \dot{\eta}_k + C_{jk} \eta_k \} = F_j e^{i\omega t} \quad (1)$$

여기서, M_{jk} : 배의 질량 및 관성모멘트 계수

A_{jk} : 부가질량 또는 부가관성모멘트 계수

B_{jk} : 감쇠모멘트 계수

C_{jk} : 복원력 계수

F_j : 파강제력 또는 파강제모멘트(힘과 모멘트는 $F_j e^{i\omega t}$ 의 실수 부분)

$\eta_k, \dot{\eta}_k, \ddot{\eta}_k$: 운동응답의 변위, 속도 및 가속도

횡방향으로 대칭인 선박에 대하여 위의 연성 운동방정식을 두 가지로 나눌 수 있는데, 하나는 상하동요(heave)와 종동요(pitch)가 연성된 방정식이며 다른 하나는 좌우동요(sway), 선수동요(yaw) 및 횡동요(roll)가 연성된 운동방정식이다.

배의 운동과 파에 의한 외력을 계산할 때는 우선 배의 각 단면에 대해 2차원적인 부가질량, 감쇄력 및 기진력을 결정한다. 운동방정식의 유체동역학적 계수들, 즉, A_{jk} 와 B_{jk} 는 2차원 단면에 대한 부가질량과 감쇄모멘트 계수로 표현되며, F_j 는 2차원 파강제력 및 파강제모멘트로 표시되어진다.

이런 2차원 단면의 유체동역학적 값들을 계산하기 위해서 close-fit method(Frank, 1967)가 사용되는데, 이 방법에서는 단면의 형상을 좌표 점을 있는 직선요소들로 나타낸다. 속도 포텐셜은 각 선 요소에서는 일정한 세기를 갖는 특이점(source, doublet 등)을 분포시켜 구한다. 주파수나 전진 속도와는 무관한 유체정역학적 복원력 계수들은 유체정역학적 고려로부터 직접 도출된다.

2.2.2 불규칙파에서의 선체운동방정식

불규칙파를 정의하기 위해서 본 연구에서는 국제수조협의회(International Towing Tank Conference, ITTC)에서 1978년에

제안된 다음 식의 표준스펙트럼(Journal of the Society of Naval Architecture of Korea, 1979)을 이용한다.

$$S_{\zeta}(\omega) = A\omega^{-5}\exp(-B/\omega^4) \quad (2)$$

$$A = 172.75\overline{H}_{1/3}^2/\overline{T}^4, \quad B = 691/\overline{T}^4$$

여기서, ω 는 파도의 원주파수, $\overline{H}_{1/3}$ 는 유의파고(significant wave height), \overline{T} 는 평균파주기(mean wave period), $S_{\zeta}(\omega)$ 는 파 에너지 스펙트럼(wave energy spectrum)을 의미한다.

대상선박의 내항성능 계산에 사용한 해상상태는 Bretschneider 파스펙트럼(Bhattacharyya, 1978)을 사용하였으며, Fig. 2에는 해상등급 5에서 해양파의 스펙트럼을 계산한 결과이다.

내항성능의 계산에 사용되는 불규칙파는 2차원 불규칙파와 3차원 불규칙파로 나누어진다. 2차원 불규칙파는 파 주파수의 함수로 표현되는 파고와 파가 일정한 방향으로 흐른다고 가정하는 것으로 이런 이상적인 경우를 장파정 해양파(Long Crested Seaway)라 하며, 3차원 불규칙파는 실제 해양파에 나타나는 것처럼 파고나 파의 주기가 불규칙할 뿐만 아니라 파가 여러 방향에서 어느 지점으로 전진해 온다고 가정하는 것으로 이런 해상상태를 단파정 해양파(Short Crested Seaway)라 부른다.

본 연구에서는 장파정 해양파에서의 대상선박의 운동값이 단파정 해양파에서의 운동값보다 특정 침로에서 크게 나타나므로 기준만족 여부를 판단하기 위한 최악의 조건을 고려하기 위하여 장파정 해양파로 가정하여 선박의 운동에 대한 수치 계산을 수행하였다.

장파정 불규칙파 중에서의 선체 운동 응답 에너지 스펙트

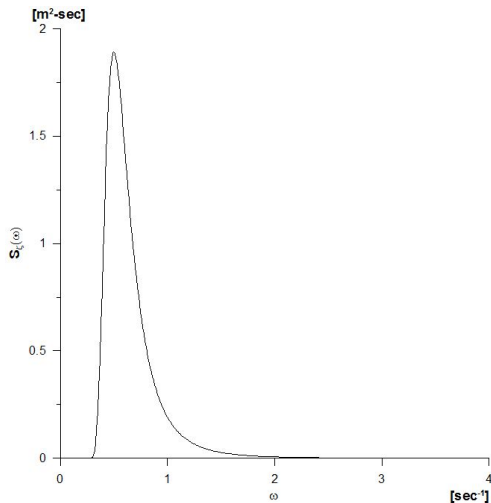


Fig. 2. Wave energy spectrum at sea state 5.

럼($S_R(\omega_e)$)은 모든 운동이 선형적이라는 가정하에 중첩의 원리를 이용하면, 단위 진폭을 가진 조우진동수(encountering wave frequency, ω_e)와 파의 입사각(wave direction, θ)에 의해 계산되는 운동응답의 응답진폭함수(Response Amplitude Operators, RAO)와 장파정 불규칙파의 조우스펙트럼 ($S_{\zeta}(\omega_e)$)을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_R(\omega_e) = [RAO(\omega_e, \theta)]^2 \times S_{\zeta}(\omega_e) \quad (3)$$

$$S_{\zeta}(\omega_e) = \frac{S_{\zeta}(\omega)}{|1 - (2\omega V/g) \cos \chi|} \quad (4)$$

불규칙 해상에서의 선체응답을 에너지 스펙트럼($S_R(\omega_e)$)으로 표시하였으므로, 응답에너지 및 모멘트를 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$m_0 = \int_0^{\infty} S_R(\omega_e) d\omega_e \quad (5)$$

불규칙한 운동 응답의 진폭이 Rayleigh 확률밀도함수 분포를 한다고 가정하면, 불규칙 파도의 통계학적 특성치에 관한 식과 마찬가지로 불규칙한 운동 응답의 특성치들은 다음과 같다.

$$RMS = \sqrt{m_0}$$

$$\overline{\sigma}_{1/3} = 2.0 \sqrt{m_0}$$

$$\overline{\sigma}_{1/10} = 2.545 \sqrt{m_0} \quad (6)$$

$$\overline{\sigma}_a = 1.25 \sqrt{m_0}$$

$$E[\sigma_{\max}] = \sqrt{2m_0} \{(\log_e N)^{1/2} + 0.2886 (\log_e N)^{-1/2}\}$$

여기서, E 는 기대치(expected value), N 은 연속된 일정 시간 동안 출현될 파고의 총 개수를 의미한다.

상기 식은 순서대로 제곱평균값(또는 표준편차), 유의진폭, 1/10 최대평균진폭, 평균진폭 그리고 σ_{\max} 의 기대치에 관한 근사식을 나타낸다.

3. 실선해석

3.1 대상선박

본 연구에서의 대상선박은 14M RIB 타입의 고속정으로 선박의 주요 제원은 Table 1과 같다.

Table 1. Principal dimensions of 14M high-speed ship

Item	Dimension
Length overall	14.10 m
Length water line	11.82 m
Breadth, moulded	4.10 m
Depth, moulded	1.55 m
Draft, design	0.77 m
Displacement, full load	13.6 ton
LCG FROM MIDSHIP	-0.997 m
KG	1.335 m
GM	1.580 m

3.2 해석조건

내항성능 계산을 위한 선박이 소형이고 특수목적선이기 때문에 경하상태(Light weight load condition)와 만재상태(Full load condition)의 차이는 크지 않다. 따라서 하중>Loading condition)은 만재상태로 하였으며 선속은 15 kts에서 실시하였다. 이때 해상등급은 5로 고정하였으며 조우각은 30 deg 간격으로 전 시계열에 대해서 각각 실시하였다. 하중조건을 요약하여 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Loading condition for seakeeping performance evaluation

Sea State	Significant Wave Height [m]	Wave Period [sec]	Loading Condition	Ship Speed [kts]	Encounter Angle [degree]
5	3.25	9.7	full load	15	0, 30, 60, 90, 120, 150, 180

3.3 평가기준

지금까지 내항성능에 대한 평가 기준은 범규나 규칙에 명시하고 있지 않지만, 선박의 이론이나 운항 경험을 통하여 정해지고 있다. 본 연구에서는 통상적으로 소형선의 평가에 사용되고 있는 내항성능 기준을 사용하였으며, 기준을 Table 3에 보인다.

3.4 해석항목

대상선박의 파랑 중 운동 및 단기응답해석을 Table 3의 항목에 대하여 수행하였으며, 이때 사용한 프로그램은 New strip method와 2절의 수학모형을 기반으로 프로그래밍 되었다.

대상선박의 내항성능 계산을 횡동요와 종동요는 선박의 무게 중심 위치(중방향 위치; 선체 중앙에서 선미 방향으로 0.997 m, 상방향 위치; 선저에서 상방향으로 1.335 m)에서, 수직 및 수평가속도는 선박의 wheel house의 중심 위치(중방향 위치; 선체 중앙, 상방향 위치; 선저에서에서 3.083 m)에서, 슬래밍은 15번 프레임(선체 중앙에서 선수쪽으로 3.84 m 위치)의 선저 위치에서, 갑판침수는 16번 프레임(선체 중앙에서 선수 방향으로 4.49 m 위치)의 상갑판 위치(선저에서 상방향으로 1.936 m 위치)에서 각각 수행하였다. 이를 요약하여 Table 4에 나타내었다.

Table 3. Seakeeping criteria

Motion Response	Definition	Criteria	
		Operation	Survival
Roll	SSA ^(*) [deg]	8.0	30.0
Pitch	SSA ^(*) [deg]	4.8	8.0
Deck Wetness	[No./hour]	30	50
Slamming	[No./hour]	20	50
Vertical Acceleration	SSA ^(*) [g]	0.4	0.8
Lateral Acceleration	SSA ^(*) [g]	0.2	0.4

(*)SSA: Significant Single Amplitude

Table 4. Specific positions for seakeeping performance evaluation

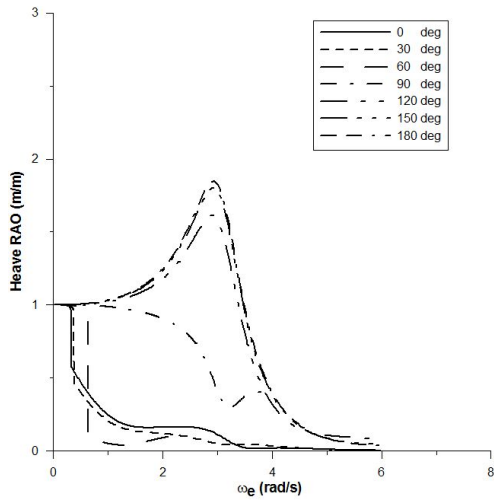
Item	Position	Units	ItemRemark
Roll	Center of Gravity	SSA [deg]	-
		MSA [deg]	Maximum Single Amplitude (MSA)
Pitch	Center of Gravity	SSA [deg]	-
Deck Wetness	Upper Deck of FR.16	[No./hour]	-
Slamming	Bottom of FR.15	[No./hour]	-
Vertical Acceleration	Center of W/H	SSA [g]	-
Lateral Acceleration	Center of W/H	SSA [g]	-

3.5 해석결과

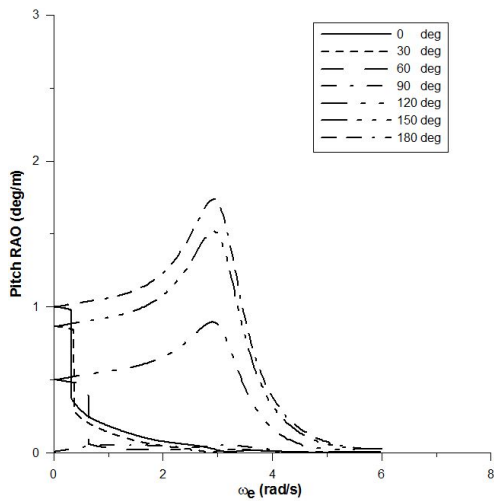
운동응답의 해석은 장파정 불규칙 파에서의 응답 해석으로 구현할 수 있으며, 이 결과가 Table 3의 평가 기준에 적합한 지 여부를 검토하기 위해서 Table 2의 조건으로 해석을 수행하였다.

만재상태에서의 결과를 Fig. 3과 Table 5에 보인다.

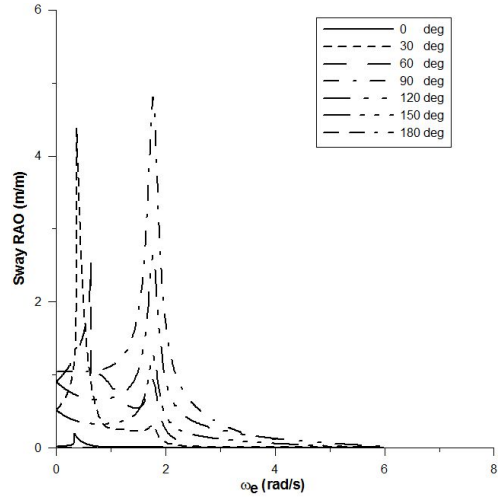
횡동요는 0° ~ 60°의 범위에서는 작업조건을 만족하고 있다. 그러나 조우각이 90° ~ 150° 부분에서는 작업조건을 초과하고 있으나 생존조건은 만족하고 있다. 또한 조우각이 150°를 초과하면 차츰 운동이 줄어들어 180°에서는 작업조건까지도 만족하고 있으며, 침수 각도(Flooding Point Angle)인 60°는 모든 구간에서 만족하고 있다.



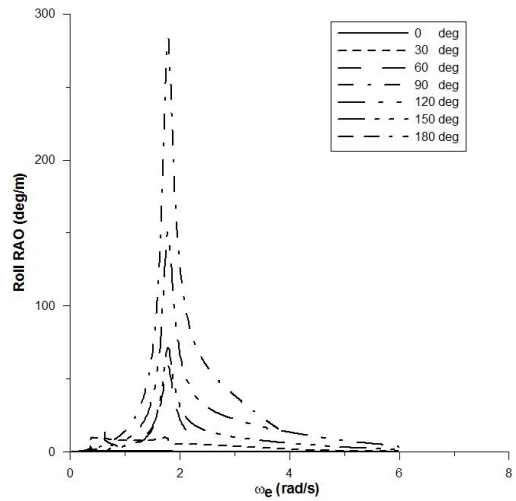
(a) RAO of heave motion



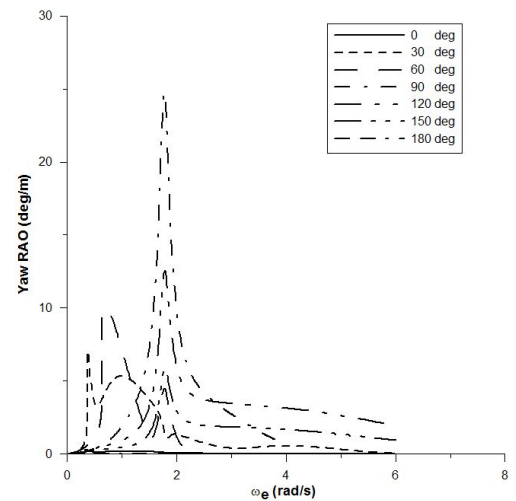
(b) RAO of pitch motion



(c) RAO of sway motion



(d) RAO of roll motion



(e) RAO of yaw motion

Fig. 3. Motion RAOs for full load condition at 15 kts.

중동요, 수직가속도 및 수평가속도, 슬래밍은 해석을 수행한 모든 경우에서 조건을 만족하고 있다.

갑판침수의 경우에는 모든 구간에서 작업 및 생존조건을 만족하지 못하고 있다. 이는 해석을 수행한 상갑판의 높이에 비해서 파고가 너무 크기 때문으로 사료된다.

Table 5. Conditions not satisfying seakeeping criteria

Item	Angle							
		0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
Roll	SSA	0.06	1.80	4.65	20.63	19.95	12.0	0.00
	MSA	0.11	3.24	8.38	37.21	35.99	21.67	0.00
Pitch		0.90	0.77	0.48	0.04	0.56	0.95	1.09
Deck Wetness		270	260	230	160	245	263	285
Slamming		11	7	3	0	2	5	5
Ver. Acc.		0.01	0.01	0.02	0.07	0.17	0.24	0.27
Lat. Acc.		0.00	0.02	0.04	0.12	0.12	0.08	0.00

4. 결론

본 연구는 14M급 RIB형 선박을 대상으로 운항한계를 검토하기 위해 직접 개발한 코드를 이용하여 설정한 기준의 만족 여부를 평가하였다.

중동요, 수직 및 수평가속도, 슬래밍의 운동성능은 모든 구간에서 작업조건을 만족하고 있으나 조우각이 90° ~ 150° 부근에서 횡동요는 작업조건을 만족하고 있지 않으며 생존조건은 전구간에서 만족하고 있다. 또한 횡동요는 모든 범위에서 침수 각도인 60°를 초과하지 않았다. 갑판침수는 해석을 수행한 모든 구간에서 생존조건조차도 크게 초과하였다. 지면에서는 언급하지 않았지만 해상상태가 3등급으로 낮아지면 30 kts에서도 설정한 모든 기준을 만족하는 것으로 검토되었다.

따라서 본 연구의 대상선박은 선박과 파의 조우각보다 선박의 건현이 내항성능에 크게 영향을 미치는 것으로 판명되었다.

후 기

본 연구는 동주대학교 교내 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

References

- [1] Ahn, Y.J., Kim, S. Y., Kim, K. H., Lee, S. W., Kim, Y. H.(2013), Study on the Effect of Density Ratio of Gas and Liquid in Sloshing Experiment, Journal of the Society of Naval Architectures of Korea, Vol. 50, No. 2, pp. 120-128
- [2] Bhattacharyya, R.(1978), Dynamics of Marine Vehicles, John Wiley & Sons, Inc., pp. 110-120.
- [3] Frank(1967), Oscillation of Cylinders in or below the Free Surface of Deep Fluids, Technical Report 2375, Naval Ship Research and Development Centre, Washington DC, U.S.A.
- [4] Journal of the Society of Naval Architecture of Korea(1979), 1978 ITTC Sea Spectrum, Journal of the Society of Naval Architecture of Korea, Vol. 16, No. 1.
- [5] Lee, J. H., Kim, Y. H.(2015), A Semi-Analytic Approach for Analysis of Parametric Roll, Journal of the Society of Naval Architectures of Korea, Vol. 52, No. 3, pp. 187-197
- [6] Lim, C. H.(2014), A Study on the Law Enforcement of Korea Coast Guard against the Illegal Chinese Fishing Vessels, Journal of the Korea Society of Marine Environment & Safety, Vol. 20, No. 1, pp. 49-58.

Received : 2015. 11. 16.

Revised : 2015. 12. 09. (1st)

: 2015. 12. 17. (2nd)

Accepted : 2015. 12. 28.