

시뮬레이션 데이터를 이용한 횡경사 각도 예측 방법 연구

† 윤동협 · 박충환* · 임남균**

*,† 중소조선연구원, **목포해양대학교 항해학부 교수

Study of the Heeling Angle Prediction by using Simulation Data

† Dong-Hyup Youn · Chung-Hwan Park* · Nam-Gyun Yim**

†, *Research Institute of Medium & Small Shipbuilding, Busan 46757, Korea

** Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

요 약 : 선박의 대형화, 고속화 및 선종의 다양화는 운송수단 중 해양 운송수단의 비중을 크게 증가시켰으나 동시에, 선박사고의 발생도 같이 증가 되었다. 선박사고의 발생은 생명과 재산의 손실뿐만 아니라 환경재해까지 일으키기 때문에 막대한 경제적, 환경적인 영향을 끼치게 된다. 특히, 여객선의 경우 인명의 피해가 크게 발생하기 때문에 선박사고를 예방하기 위한 방법들이 논의 되어 지고 있다. 본 연구에서는 여객선의 횡경사 각도를 바탕으로 전복의 위험까지 가게 되는 시간을 예측하여 위험시간에 도달하기 전에 인명을 대피할 수 있는 기초 자료를 제공하고자 하였다. 2012년~2016년 사이 침몰사고를 바탕으로 특정 시나리오를 설정하였으며, PRR1의 데이터를 MOSES V20을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과는 시간에 따른 횡경사 각도이며, 횡경사 예측을 위한 1차, 2차 방정식을 이용하여 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 1차방정식의 경우 시뮬레이션 데이터가 선형적인 그래프를 나타내었기 때문에 낮은 오차율을 보이고 있으며, 2차방정식의 경우 초기에는 낮은 오차율을 보이고 있으나 추후 발생하는 각도에 대해서는 높은 오차율을 보이고 있었다.

핵심용어 : 위험시간, 횡경사 각도 예측, 선형, 2차 방정식, 선박사고

Abstract : As ships become bigger, faster, and diverse, transportation has increased the usage of marine vehicles. However, ship accidents are increasing. Ship accidents cause loss of life and property as well as environmental disasters. The occurrence of ship accidents causes enormous economic and environmental impacts. Notably, in the case of passenger ships, methods for preventing ship accidents are being discussed to avoid losing numerous human lives. The purpose of this study is to provide essential data for evacuation before reaching the dangerous time by predicting the time to reach the risk of capsizing based on the heeling angle of the passenger ship. Based on sinking accidents between 2012 and 2016, we set up specific scenarios and simulated the PRR1 data using commercial software MOSES V20. In the case of the linear equation, the simulation results showed a low error rate because the simulation data showed the linear graph. In the case of the quadratic equation, the error rate was low at the beginning but showed a high error rate at the subsequent angle.

Key words : Dangerous Time, Heeling Angle Prediction, Linear, Quadratic Equation, Ship Accident

1. 서 론

선박의 대형화, 고속화 및 선종의 다양화는 운송수단 중 해양 운송수단의 비중을 크게 증가시켰다. 이와 동시에, 선박사고의 발생도 함께 증가 되었다(Kim, 2016). 선박사고의 발생은 생명과 재산의 손실뿐만 아니라 환경재해까지 일으키기 때문에 막대한 경제적, 환경적인 영향을 끼치게 된다. 특히, 여객선의 경우 인명의 피해가 크게 발생하기 때문에 선박사고를 예방하기 위한 방법들이 논의 되어 지고 있다.

한편, 선체의 손상은 느리게 진행되는 수선면 및 접수면의 변화를 가져오며 동시에 해양파에 의한 선체 응답운동이 보다

빠르게 진행된다. 따라서 입사파, 선박의 자세변화에 따른 산란파, 방사파에 더하여 선체내부의 침수로 인한 내부유동이 발생 하는 등 매우 복잡한 유동에 기인한 하중을 받게 된다. 이로 인하여, 손상선박은 동적 안정성이 보장되지 않아 전복 또는 침몰하는 경우가 있고 손상 선박의 동적 안정성이 보장되는 경우에도 복잡한 파 하중에 의하여 선체의 파손이 진행되어 침몰할 가능성이 높다. 또한 항주 시 복원성의 변화를 주어 조종성능에도 많은 변화를 주게 된다(Choi, 2016).

선체의 손상 침수부위를 가정하여 6자유도 선체운동 및 3차원 파랑하중 해석을 수행한 연구가 많이 진행되었으며(Dillingham, 1981; Santos, 2003; Santos, 2008), 수조실험을 통하여 대칭 손

† Corresponding author : 정희원, dhyoun@rims.re.kr 051)974-5569

* 정희원, chpark@rims.re.kr 051)974-5523

** 종신회원, namkyun.im@mmu.ac.kr 061)240-7177

(주) 이 논문은 “조석이 큰 해역에서의 해안과정과 항만퇴적의 변화”란 제목으로 “2018 공동학술대회 한국항해항만학회논문집(목포해양대학교, 2010.4.4.22-24, pp.101-103)”에 발표되었음.

상의 경우 동적 응답에 영향을 미치는 것을 알 수 있었으며 선박의 고유 진동수를 약간 증가시키는 것을 알아냈다 (Santos, 2002). 구획의 범람으로 인하여 선박의 운동특성을 시간 영역(Time domain) 관점에서의 연구도 진행하였다 (Santos, 2008). 하지만 위의 연구에서는 시간 영역에서의 연구 역시 최종적으로 선박이 위험해지는 영역까지의 예측 보다는 특정 위치의 손상을 통한 운동의 특성을 연구하고 있었다. 또한, 특정 위치의 손상으로 인하여 내부 유동 특성을 고려한 운동 특성을 분석하고, 손상안정성까지의 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 여객선의 횡경사 각도를 바탕으로 전복의 위험까지 가게 되는 시간을 예측하여 위험시간에 도달하기 전에 인명을 대피할 수 있는 기초 자료를 제공하고자 하였다. 선체의 손상을 받았을 때, 선박이 기울어져 손상안정성을 찾는 조건이 아닌 횡경사가 계속 발생한다는 전제조건이 있으며, 현재 시점에서의 횡경사와 과거 시점의 횡경사 각도를 이용하여 특정 횡경사 각도까지 남은 시간을 예측하고자 하였다. 2장에서는 이론 및 대상선박의 제원, 모델링 방법 및 수치해석방법에 대하여 설명하였고, 3장에서는 수치해석 결과에 대한 설명, 4장에서는 수치해석을 통한 특정 횡경사 각도 시간 예측에 대한 설명을 하였고 5장에 결론을 내렸다.

2. 이론 및 수치해석 방법

2.1 이론식

유체 및 선체 운동에 대한 수학적 설명을 하기 위하여 선체 고정 좌표계를 사용하였다. 회전 중심을 사용하여, 선체의 움직임은 병진 좌표계로 Fig.1.과 같이 설명 할 수 있다.

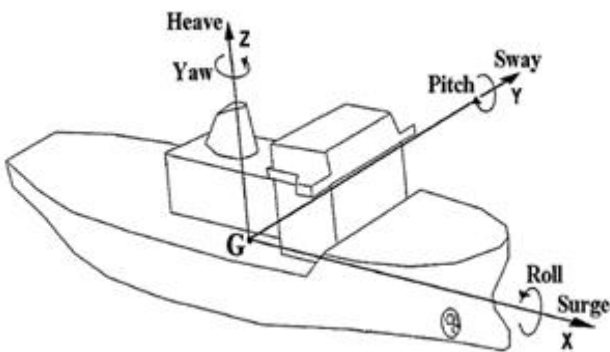


Fig. 1 Coordinate system for ship motions

과고와 과경사는 선형과 이론을 사용할 수 있도록 작다고 가정한다. 유체는 비압축성, 비점성으로 가정되며, 유체의 흐름은 비 회전식이라고 가정하면 유동장은 속도포텐셜의 기울기로 표현 될 수 있다. 라플라스 방정식에 의해 지배되고 또한, 적절한 경계조건을 만족하여야 한다. 선체는 강체이고 안정된 평형 상태에 있다. 선체에 작용하는 유체 역학적 힘을 고려하

게 되면, 운동방정식은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\sum_{j=1}^6 x_j [-\omega^2 (M_{ij} + A_{ij}) - i\omega (B_{ij} + B_{ij}^v) + (C_{ij} + K_{ij})] = F_i \quad (1)$$

여기에서 B_{ij}^v 는 점성 댐핑 매트릭스이며, C_{ij} 는 정수압 복원 매트릭스, K_{ij} 는 외부 계류 강성 매트릭스이다.

2.2 선박 제원

선박사고를 재현하기 위하여 전문가 위원회의 보고서에 활용된 ITTC 벤치 마크 연구에서 광범위하게 연구된 Ro-Ro 선박 중 하나인 PRR1을 사용하였으며(The Specialist Committee on Prediction of Extreme Ship Motions and Capsizing (Chaired by D. Vassalos) 2002; Spanos, 2002) PRR1의 제원은 Table 1에 나타내었다

Table 1 Main particulars of passenger Ro-Ro ship PRR1

Dimensions	Unit	Value
Displacement, Δ	ton	17268.00
Length between perpendiculars, L_{pp}	m	170.00
Breadth, B	m	27.80
Depth to the main deck, D_{md}	m	9.40
Depth to the upper deck, D_{uD}	m	17.78
Draught, T	m	6.25
Metacentric height, GM	m	2.63
Roll natural periods, T_s	s	13.00

Fig. 2.에는 Ro-Ro선인 PRR1의 정면도를 보여준다. 선체의 선수에는 벌브가 있으며 선수와 선미에는 적정한 플레어가 있다.

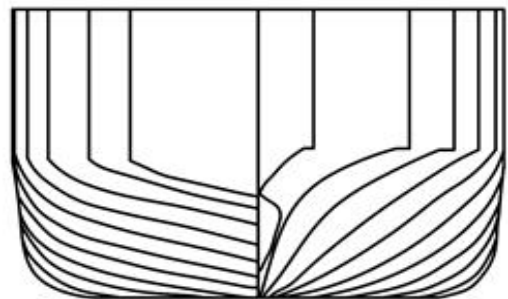


Fig. 2 Body plan of passenger Ro-Ro ship PRR1(The Specialist Committee on Prediction of Extreme Ship Motions and Capsizing, 2002)

2.3 파공 선정

선체의 손상을 가정하기 위하여 파공의 위치를 선정하였다. 파공의 위치는 구획 9의 선저부분에서 발생을 하도록 하였으며, 구획 9의 제일 윗부분(선저에서 3m부분)으로부터 선수미 인접구획으로 물이 들어갈 수 있도록 하였다. 파공의 크기와 각 구획 간 물이 이동할 수 있는 구멍의 크기 등은 Table 2에 나타내었다. 구멍의 크기는 2012~2016년 사이 파공사고를 기초로 하여 선정하였다.

Fig. 3.에서는 침수대상이 되는 구획을 보여 주며, 이 구획은 구획 9(후미 구획), 10 및 11으로 되어 있으며 우현의 침수만 고려하였다.

Table 2 Information of wrecked hole and connect hole (at bow bottom, 0, 0, 0)

Measurement	Unit	Value
Position of wrecked hole	m	80, 11, 2
Size of wrecked hole(diameter)	m	0.2
Type of wrecked hole	-	circle
Position of connect hole	m	78.155, 8, 5
Size of connect hole(diameter)	m	0.2

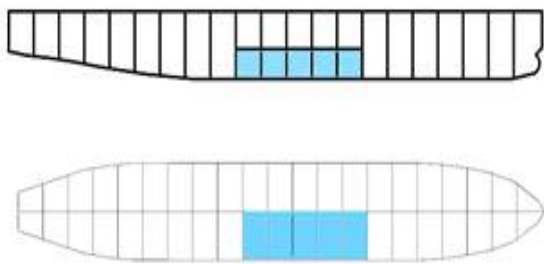


Fig. 3 Vessel's compartmentation below car deck and studied damage case

2.4 해상 상태와 수치해석 방법

수치해석은 상용소프트웨어인 MOSES 7.10 V20을 사용하였다. MOSES의 경우 선체와 내부 구획을 모델링 하여 Strip 이론과 3d diffraction 이론을 통하여 해석을 수행할 수 있다. 3d diffraction 이론의 경우 potential 이론이기 때문에 선박 전체를 모델링해야하지만 3차원 속도 포텐셜을 직접 구하는 것이 해의 정도를 높일 수 있기 때문에 3d diffraction 이론으로 수행하였다. 해상의 상태는 Sea state 3상태로 가정하였으며, Table 3에는 Sea State를 단계별로 나타낸 표이다.

Table 3 Sea state characteristics

Number	Wave height (m)	Wind speed (m/s)	Characteristics
0	0	0.771	Calm(glassy)
1	0 - 0.1	2.572	Calm(rippled)
2	0.1 - 0.5	4.372	Smooth(wavelets)
3	0.5 - 1.25	6.945	Slight
4	1.25 - 2.5	9.774	Moderate
5	2.5 - 4	12.604	Rough
6	4 - 6	19.291	Very rough
7	6 - 9	26.494	High
8	9 - 14	30.609	Very high
9	Over 14	32.924	Phenomenal

사용된 스펙트럼은 Bretschneider 스펙트럼으로서 파고와 파주기를 매개변수로 하는 2-파라미터 스펙트럼으로 특히 외해에 적용할 수 있는 스펙트럼이다.

$$S_B(\omega) = \frac{A}{\omega^5} \exp\left(\frac{-B}{\omega^4}\right) \quad (2)$$

$$A = 172.75 \frac{H_{char}^2}{T^4}, B = \frac{691}{T^4} \quad (3)$$

3. 수치해석 결과

3.1 자유횡동요 감쇠 해석 결과

수치해석의 정확도를 평가하기 위하여 PRR1이 파공이 발생하기 전의 모델링에 대한 검토가 필요하여 이론과 실험 및 시뮬레이션데이터간의 고유 진동주기를 비교하였다. PRR1의 고유진동주기는 13초이다. 자유횡동요 감쇠실험을 통하여 수치해석을 위한 선박의 회전반경은 다음의 식에 의해 구할 수 있다.

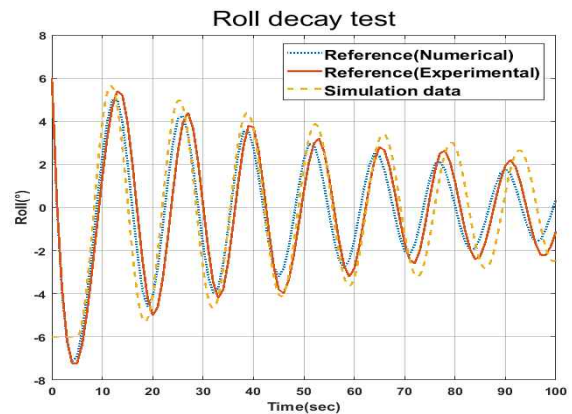


Fig. 4 Roll decay test(includes results from study of damaged ship motions taking into account floodwater dynamics(The Specialist Committee on Prediction of Extreme Ship Motions and Capsizing, 2002))

자유횡동요 감쇠 결과에서 횡요 주기가 T이면, $\omega = 2\pi/T$ 의 관계를 가지고 고유각속도 ω_n 은 식 (4)와 같다.

$$\omega_n = \frac{\sqrt{4\pi^2 + (\ln\lambda)^2}}{T} \quad (4)$$

여기서 λ 는 횡운동 진폭감쇠비로서 자유횡동요 감쇠로 얻을 수 있다.

관성반경은 식 (5)로 구할 수 있다.

$$k = \sqrt{\frac{g \cdot GM}{4\pi^2 + (\ln\lambda)^2}} \times T \quad (5)$$

GM의 경우 2.63m를 두어 PRR1의 수치해석의 결과와 유사하게 만들었으며, 횡동요 Damping 감쇠비는 0.75를 두어 감쇠의 폭을 맞추었다. Fig. 4는 자유횡동요 감쇠 커브를 나타내고 있으며, 실험 데이터와 비교하였을 때, 수치해석의 경우 12.9초를 나타내고 있어 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

3.2 주파수 영역 해석 결과

주파수영역에 대한 해석을 수행함으로써 횡동요에 대한 진폭 응답특성함수를 찾을 수 있으며 선박의 공진 주파수 등을 찾을 수 있다. Fig. 5에서는 횡동요에 대한 진폭응답특성함수(RAO)에 대한 결과를 보여주고 있으며, 실험 데이터와 유사한 지점에서 피크값을 가지는 것을 알 수 있다.

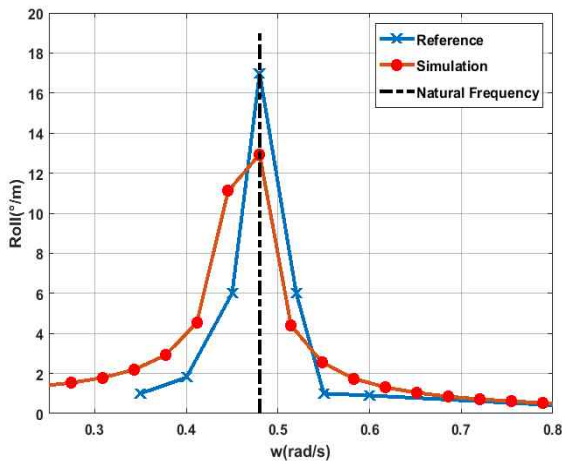


Fig. 5 Roll motion response amplitude operator(includes results from the Specialist Committee on Prediction of Extreme Ship Motions and Capsizing, 2002)

3.3 시간영역 해석 결과

시간영역의 해석은 선박의 손상이 일어난 경우에 대해서 특

정 횡경사 각도까지 걸리는 시간을 수치해석으로 계산하였다. Fig. 6은 시간영역에서의 선박의 횡동요 결과를 나타내고 있다. 횡경사 각도가 증가하는 것은 선형적으로 증가하고 있으며, 세부구간의 경우 선박이 좌우로 흔들리는 현상을 보이고 있다.

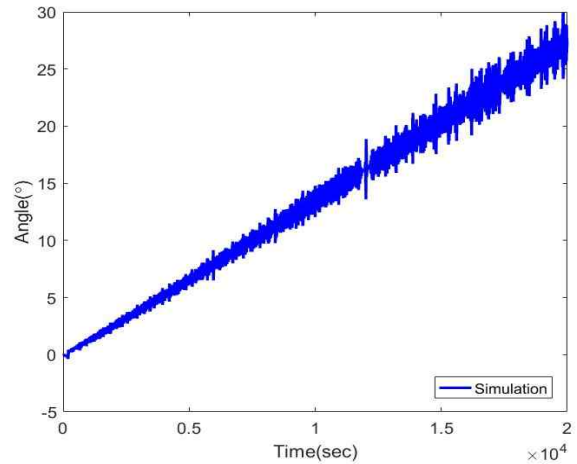


Fig. 6 Result of time domain analysis

4. 횡경사 각도 예측방법 및 결과

4.1 횡경사 각도 예측방법

횡경사 각도 예측방법은 시뮬레이션 결과를 바탕으로 수행하였다. 특정한 각도에 도달하는 시간의 차이를 이용하여 추후 원하는 각도까지 걸리는 시간을 예측하는 방법이다. 시간을 예측하는 방법은 1차 방정식과 2차 방정식으로 나누어 계산을 수행하였다.

1차 방정식의 경우 과거의 각도(a_1)와 그때 발생된 시간(t_1), 현재 각도(a_2)와 현재 시간(t_2), 추후 원하는 각도(a_3)과 추후 발생되는 시간(t_3)이라고 하였을 때 식 (6)로 추후 원하는 각도가 발생하는 시간을 예측할 수 있다.

$$t_3 = \frac{t_2 - t_1}{a_2 - a_1} \times (a_3 - a_2) \quad (6)$$

2차 방정식의 경우 과거의 각도(a_4)와 그때 발생된 시간(t_4), 과거의 각도와 현재의 각도 사이의 각도(a_5)와 그때 발생된 시간(t_5), 현재 각도(a_6)와 현재 시간(t_6), 추후 원하는 각도(a_7)와 추후 발생되는 시간(t_7)이라고 하였을 때 식 (7)로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} t_4^2 & t_4 & 1 \\ t_5^2 & t_5 & 1 \\ t_6^2 & t_6 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{bmatrix} \quad (7)$$

추후 원하는 각도가 발생하는 시간을 예측하는 방정식 식 (8)과 같다.

$$at_7^2 + bt_7 + c = a_7 \quad (8)$$

여기에서 a, b, c는 식 5에서 찾게 되는 상수 이다.

4.2 횡경사 각도 예측 결과

횡경사 각도를 예측하고자 a_1 에서부터 a_7 까지 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Angle definition each equation

Angle	Value	Note
a_1	5°	Equation 4
a_2	7°	Equation 4
a_3	18°	Equation 4
a_4	3°	Equation 5
a_5	5°	Equation 5
a_6	7°	Equation 5
a_7	18°	Equation 5

Table 5에는 a_1 에서부터 a_3 까지를 이용하여 시간영역해석 데이터로부터 t_1 에서부터 t_3 까지를 찾아 5~18도 까지 예측 시간 및 오차율(Error)를 나타내고 있다.

Table 5 Result of the linear equation

Angle(°)	Time(sec)	Prediction time at a_3	Error
5	3,453	3,571	3.31
7	4,868	5,000	2.64
9	5,957	6,428	7.33
11	7,794	7,857	0.80
13	8,993	9,285	3.15
15	10,420	10,714	2.74
18	12,006	12,857	6.62

오차율은 최대 7.5%를 나타나고 있으며 11도에서 가장 작은 오차율을 가진다. 최종적으로 추후 발생하는 각도 예측에 대한 부분도 최대 6.62%의 오차율을 보이고 있다.

Table 6에는 a_4 에서부터 a_7 까지를 이용하여 시간영역해석 데이터로부터 t_4 에서부터 t_7 까지를 찾아 5~18도까지 예측 시간 및 오차율을 나타내고 있다.

Table 6 Result of the quadratic equation

Angle(°)	Time(sec)	Prediction time at a_7	Error
5	3,453	3,453	0.00
7	4,868	4,868	0.00
9	5,957	6,366	6.42
11	7,794	7,964	2.13
13	8,993	9,685	7.14
15	10,420	11,563	9.88
18	12,006	14,795	18.85

Fig. 7.에는 a_1 에서부터 a_7 까지 시간영역해석 데이터를 바탕으로 t_1 에서부터 t_7 까지를 찾아 그래프를 나타낸 것이다.

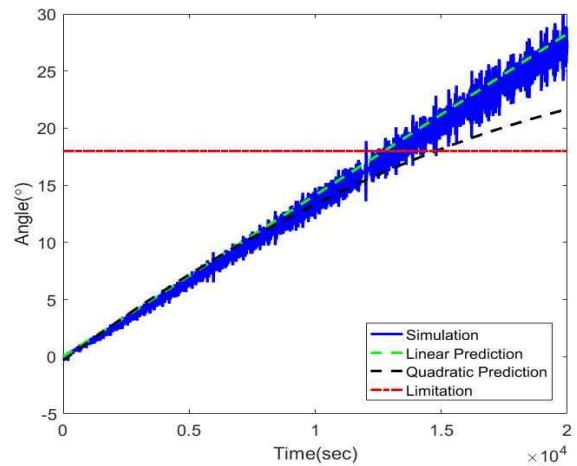


Fig. 7 Comparison of linear equation and quadratic equation

시간영역해석 데이터가 선형적인 그래프를 나타내기 때문에 a_1 에서부터 a_3 까지를 사용한 식이 a_4 에서부터 a_7 까지 사용한 식보다 오차율이 낮은 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 여객선의 횡경사 각도를 바탕으로 전복의 위험까지 가게 되는 시간을 예측하기 위한 초기연구로 진행되었다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

PRR1을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였으며, 파공의 조건 및 해상의 조건을 두어 주파수영역 해석을 수행하여 시뮬레이션의 정확도를 확인하였으며, 시간영역 해석을 통하여 횡경사 각도의 특성을 분석하였다. 그 결과 횡경사 각도는 시간에 따라 선형적으로 나타났으며 세부적으로 보았을 경우 선박이 좌우로 짧은 주파수로 흔들리는 것을 알 수 있었다.

횡경사 각도 예측방법을 통하여 특정한 각도에 도달하는 시간을 예측하였으며 예측방법은 1차 방정식과 2차방정식으로 도출이 되었다. 1차방정식의 경우 시뮬레이션 데이터가 선형적인 그래프를 나타내었기 때문에 낮은 오차율을 보이고 있었으며 2차방정식의 경우 초기에는 낮은 오차율을 보이고 있으나 추후 발생하는 각도에 대해서는 높은 오차율을 보이고 있었다.

본 연구는 여객선의 횡경사 각도 예측함으로써 전복의 위험까지 가게 되는 시간을 예측하는 것을 목적으로 하였으며, 추후, 더 많은 데이터를 바탕으로 수정된 경험식을 도출하는 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 “선박 및 인명 대피 지원 기술 개발”사업의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사합니다.

References

- [1] Choi, B. R. and Yim, N, G. (2016), “A Study on the Relationship between Ship Stability and Maneuverability Using Free Running Model Experiments,” Journal of navigation and port research, Vol. 40, No. 6, pp. 353-360.
- [2] Dillingham, J. T. (1981), “Motion studies of a vessel with water on deck,” MaTecnol, Vol. 18, No. 1, pp. 38-50.
- [3] Kim, I. C. and An, K. (2016). “Comparision and Analysis on Risk Assessment Models of Coastal Waters considering Human Factors,” J. Navig. Port Res. Vol. 40, No. 1, pp. 27-34.
- [4] Santos, T. A., Winkle, I. E. and Guedes Soares, C. (2002), “Time domain modeling of the transient asymmetric flooding of ro-ro ships,” Ocean

Engineering, Vol. 29, pp. 667-688.

- [5] Santos, T. A. and Guedes Soares, C. (2003), “Investigation into the effects of shallow water on deck in ship motion,” Proceedings of the 8th international conference on the stability of ships and ocean vehicles, pp. 81-96.
- [6] Santos, T. A. and Guedes Soares, C. (2008), “Study of damaged ship motions taking into account floodwater dynamics,” Journal of Marines Science and Technology, Vol. 13, pp. 291-307.
- [7] Spanos, D. and Papanikolaou, A. (2002), “On the modeling of flooding water dynamics and its effects on ship motions,” Proceedings of the 6th international ship stability workshop.
- [8] The Specialist Committee on Prediction of Extreme Ship Motions and Capsizing (Chaired by D. Vassalos), (2002), “Final report and recommendations to the 23rt ITTC,” Proceedings of the 23rt international towing tank conference, pp. 625-641.

Received 12 November 2018

Revised 27 November 2018

Accepted 19 August 2019