

손상 선박의 자세를 고려한 여객선 승객 탈출 시뮬레이션

하 솔¹·조윤옥²·구남국^{1,†}·이규열¹·노명일³
서울대학교 공학연구소¹
삼성중공업 구조설계2팀²
서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학연구소³

Passenger Ship Evacuation Simulation Considering External Forces due to the Inclination of Damaged Ship

Sol Ha¹·Yoon-Ok Cho²·Namkug Ku^{1,†}·Kyu-Yeul Lee¹·Myung-Il Roh³
Seoul National University, Engineering Research Institute¹
Samsung Heavy Industry, Structure Engineering Team 2²
Seoul National University, Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering and Research Institute of Marine Systems Engineering³

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

This paper presents a simulation for passenger ship evacuation considering the inclination of a ship. In order to describe a passenger's behavior in an evacuation situation, a passenger is modeled as a rigid body which translates in the horizontal plane and rotates along the vertical axis. The position and rotation angle of a passenger are calculated by solving the dynamic equations of motions at each time step. To calculate inclined angle of damaged ship, static equilibrium equations of damaged ship are derived using "added weight method". Using these equations, physical external forces due to the inclination of a ship act on the body of each passenger. The crowd behavior of the passenger is considered as the flock behavior, a form of collective behavior of a large number of interacting passengers with a common group objective. Passengers can also avoid an obstacle due to penalty forces acting on their body. With the passenger model and forces acting on its body, the test problems in International Maritime Organization, Maritime Safety Committee/Circulation 1238(IMO MSC/Circ.1238) are implemented and the effects of ship's inclination on the evacuation time are confirmed.

Keywords : Advanced evacuation analysis(승객 탈출 해석), Acceleration-based passenger model(가속도 기반 승객 모델), Damage Stability(손상 시 복원성)

1. 서론

선박의 탈출 상황에서 모든 승객이 탈출하는데 걸리는 시간을 계산하고, 탈출에 발생하는 병목 구간을 미리 확인하는 것이 승객 탈출 시뮬레이션의 목적이다. 이에 관한 관련 규정은 2007년에 발표된 IMO (International Maritime Organization) MSC Circ. 1238 "Guidelines on evacuation analysis for new and existing passenger ship" (IMO, 2007)이다.

승객 개개인의 특성을 고려한 승객 탈출 시뮬레이션을 'advanced evacuation analysis'라고 한다. Advanced evacuation analysis에서 고려되는 요인들로는 연령, 성별, 체중, 신체 사이즈, 침착성, 가족 동반 여부와 같은 승객 개개인의 특성뿐만 아니라, 승객 간 상호 작용, 장애물, 화재, 선박의 자세와 같은 외부 요인들이

있다. 승객 모델에는 이러한 요인을 승객의 속도 감소 효과로 고려하는 속도 기반 모델(walking velocity based model)과 승객의 운동에 내적 혹은 외적인 힘으로 고려하는 가속도 기반 모델(acceleration based model)이 있다. Advanced evacuation simulation을 위해서는 이러한 요인들을 파악하여 승객 모델에 반영하는 것이 중요하다 (Kim, et al., 2001).

Choi, et al. (2010)은 IMO 피난지침을 기반으로 여객선 탈출 시간 계산을 위한 프로그램을 개발하였다. Park, et al. (2010)은 속도 기반 모델에 승객 간 상호 작용과 장애물을 고려하였고, Jeong, et al. (2010)은 가속도 기반 모델에 승객간 상호 작용과 장애물을 고려한 승객 탈출 시뮬레이션을 구현하였다.

선박에서는 Fig. 1과 같이 인한 선박의 자세가 탈출 시 승객의 이동에 영향을 미치기 때문에 선박의 자세 계산을 고려하는 것이 필수적이다. 본 논문에서는 Jeong, et al. (2010)의 연구의 확장

으로 선박이 손상된 경우에 선박의 자세를 계산하고, 이 자세를 외력으로 승객 모델에 고려하여, 승객 탈출을 시뮬레이션 하였다.

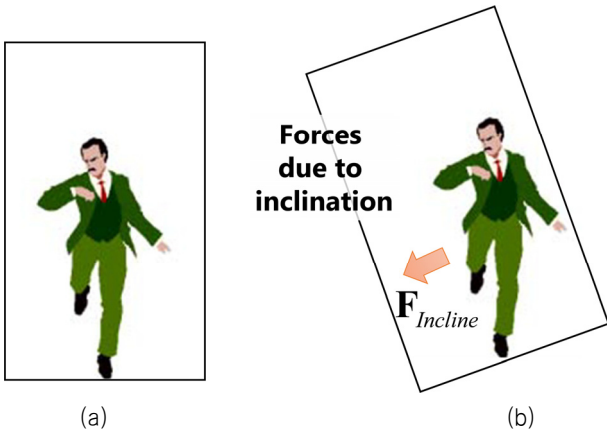


Fig. 1 Forces acting on passenger's body due to the inclination of a ship: (a) before the inclination, (b) after the inclination

본 논문의 2장에서는 승객 탈출 시뮬레이션에 관련된 연구 현황을 소개하고, 3장에서는 손상 선박의 자세 계산 모델을 설명한다. 4장에서는 본 논문에서 이용한 가속도 기반 승객 모델을 설명하고, 5장에서는 손상 선박의 자세를 고려한 승객 탈출 시뮬레이션 프로그램의 개발과 검증에 대해서 설명한다. 마지막으로 6장에서는 결론 및 향후 연구 방향에 대해서 서술하였다.

2. 관련 연구 현황

Galea, et al. (2003)은 속도 기반 모델(velocity-based pedestrian model)을 기반으로 'maritimeEXODUS'라는 여객선 승객 탈출 분석 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 손상 선박에

의한 자세 계산을 지원하고 있으며, 계산된 선박의 자세는 보행 속도에 감쇄 계수로 반영된다 (Sharp, et al., 2003). Schreckenberg, et al. (2001)은 속도 기반 모델을 바탕으로 'AENEAS'라는 여객선 승객 탈출 분석 프로그램을 개발하였으며, 침수에 따른 선박 자세 계산 기능은 없고, 기존 실험 결과로부터 얻은 감쇄 계수를 승객의 보행 속도에 반영한다 (Meyer-König, et al., 2007). Choi, et al. (2007)은 선박에서 화재가 발생하는 상황을 묘사 하였으며, 이를 선박에 적용하였다.

Vassalos, et al. (2001)은 속도 기반 모델을 사용하여 'Evi'라는 승객 탈출 분석 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 'Evi'에서는 'PROTEUS'라는 프로그램을 통해 선박의 침수 자세 및 침수 높이를 계산하고, 이를 승객의 보행 속도에 감쇄 계수를 곱하는 형식으로 반영하거나, 혹은 전체 승객 탈출 소요 시간을 계산한 후 이를 반영한다 (Guarin, et al., 2004).

Helbing, et al. (2000, 2001)은 뉴턴의 운동 방정식을 기반으로 하는 가속도 기반 승객 모델을 제안하였다. Korhone and Hostikka (2009)는 Helbing이 제안한 가속도 기반 승객 모델을 기반으로 'EVAC'이라는 여객선 승객 탈출 분석 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램에서는 선박의 자세에 대한 승객의 보행 속도 변화를 감쇄 계수로 고려하고 있지만, 손상 선박의 자세를 직접 계산하는 기능은 없다 (Sharp, et al., 2003). Table 1은 관련 연구에서 개발한 여객선 승객 탈출 프로그램의 주요 기능을 비교한 내용을 나타낸다.

기존의 연구에서 선박 경사에 대한 고려는 승객의 보행 속도에 감쇄 계수를 고려하거나, 전체 승객 탈출 소요 시간에 가중치를 부여하는 방식으로 진행되어 왔다. 본 논문에서는 이와 다르게 승객 모델을 구성하는 하나의 항목으로 선박 경사에 의한 보행 속도의 변화를 고려하였다. 또한 선박의 경사를 roll 방향과 pitch 방향으로 모두 고려하였으며, 기존에 수행된 다수의 실험 결과를 통계적으로 분석하여 이를 승객 모델에 반영하였다.

Table 1 Comparison between simulation programs for advanced evacuation analysis

Advanced evacuation analysis program	This paper	IMEX	EVAC	Evi	Maritime EXODUS
Passenger model	Acceleration-based model	Acceleration-based model	Acceleration-based model	Velocity-based model	Velocity-based model
Geometry representation	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous	Discrete cell
Rotation of Passenger	O	X	O	X	X
Inclination of Ship	O	O	X	O	O
Method considering the inclination	External force		-	Velocity profile	Velocity profile
	Angle	Sine value of angle			
Crowd behavior	Forces due to the crowd			Same velocity for each group	Gene concept
	Flock behavior	X	Helbing's group behavior		
Obstacle/Wall	Penalty force	O	unknown	-	-
IMO Test Case	O	X	X	O	O

3. 손상 선박의 자세 계산 모델

선박의 특정 자세에서의 작용하는 힘과 모멘트를 알고, 그 때의 선박의 자세 변화에 따른 힘과 모멘트의 미분 계수를 안다면, 다음의 식 (1)을 이용하여 선박의 평형 자세를 계산할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_z(\mathbf{r}^*) - F_z(\mathbf{r}^{(k)}) \\ M_r(\mathbf{r}^*) - M_r(\mathbf{r}^{(k)}) \\ M_L(\mathbf{r}^*) - M_L(\mathbf{r}^{(k)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_z(\mathbf{r}^{(k)})}{\partial T} & \frac{\partial F_z(\mathbf{r}^{(k)})}{\partial \phi} & \frac{\partial F_z(\mathbf{r}^{(k)})}{\partial \theta} \\ \frac{\partial M_r(\mathbf{r}^{(k)})}{\partial T} & \frac{\partial M_r(\mathbf{r}^{(k)})}{\partial \phi} & \frac{\partial M_r(\mathbf{r}^{(k)})}{\partial \theta} \\ \frac{\partial M_L(\mathbf{r}^{(k)})}{\partial T} & \frac{\partial M_L(\mathbf{r}^{(k)})}{\partial \phi} & \frac{\partial M_L(\mathbf{r}^{(k)})}{\partial \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta T^{(k)} \\ \delta \phi^{(k)} \\ \delta \theta^{(k)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 \mathbf{r} 은 선박의 x, y, z 방향 위치와 자세를 의미한다. 식 (1)에서 선박의 자세 변화에 대한 힘과 모멘트의 미분 계수들은 central difference method과 같은 수치적 계산 방법으로 구할 수 있다. 하지만, 현재 자세와 미소 변화 자세의 힘과 모멘트를 모두 다 계산을 해야 하므로 계산 량이 많다.

본 논문에서는 식 (1)의 미분 계수를 계산하기 위해 수선면과 수선면 하부의 부피를 이용하여 해석적으로 유도한 결과를 이용하였다 (Ku, 2012). 유도된 미분 계수는 선박 계산에 사용되는 유체 정역학적 계수들로 표현된다. 미분 계수 행렬의 주대각성분은 식 (2)와 같다. 이렇게 유도한 미분계수를 사용하면, 수선면과 관계된 계수로만 표현되기에 계산량을 줄여 빠르게 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_z(\mathbf{r}^{(k)})}{\partial T} &= -\rho g A_{WP}(\mathbf{r}^{(k)}) + \rho g a_{WP}(\mathbf{r}^{(k)}) \quad (2) \\ \frac{\partial M_T(\mathbf{r}^{(k)})}{\partial \phi} &= mg \cdot z_G(\mathbf{r}^{(k)}) - \rho g \cdot V(\mathbf{r}^{(k)}) \cdot z_B(\mathbf{r}^{(k)}) \\ &\quad - \rho g I_T(\mathbf{r}^{(k)}) - F_{Ext}(\mathbf{r}^{(k)}) \cdot z_{Ext}(\mathbf{r}^{(k)}) \\ &\quad + \rho g i_T(\mathbf{r}^{(k)}) \\ \frac{\partial M_L(\mathbf{r}^{(k)})}{\partial \theta} &= mg \cdot z_G(\mathbf{r}^{(k)}) - \rho g \cdot V(\mathbf{r}^{(k)}) \cdot z_B(\mathbf{r}^{(k)}) \\ &\quad - \rho g I_L(\mathbf{r}^{(k)}) - F_{Ext}(\mathbf{r}^{(k)}) \cdot z_{Ext}(\mathbf{r}^{(k)}) \\ &\quad + \rho g i_L(\mathbf{r}^{(k)}) \end{aligned}$$

4. 손상 선박의 자세로 인한 물리적인 외력을 고려한 승객 탈출 시뮬레이션

4.1 가속도 기반 승객 모델

본 논문에서는 가속도 기반 모델에 승객의 개인의 특성 중 연

령, 성별, 체중, 신체사이즈를 고려하고, 승객간 상호 작용과 장애물을 고려하였다. \mathbf{x} 는 승객의 위치 및 자세를 나타내며, 가속도 기반 모델에 따라 승객의 질량(m), 가속도($d^2\mathbf{x}(t)/dt^2$)와 승객에 작용하는 힘(\mathbf{F}_{Total})의 관계는 식 (3)과 같다. 여기서 승객에 작용하는 외력은 식 (4)과 같다.

$$m \frac{d^2\mathbf{x}(t)}{dt^2} = \mathbf{F}_{Total}(t) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{Total}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t) &= \mathbf{F}_{Des}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t) + \mathbf{F}_{Penalty}(\mathbf{x}, t) \\ &\quad + \mathbf{F}_{Flocking}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t) + \mathbf{F}_{Contact}(\mathbf{x}, t) \\ &\quad + \mathbf{F}_{Incline}(\mathbf{r}^*, t) \end{aligned} \quad (4)$$

- \mathbf{F}_{Total} : 승객에 작용하는 전체 외력
- \mathbf{F}_{Des} : 목표 지점을 향하여 이동하려는 힘, 심리적인 외력, 자가 추진력(\mathbf{F}_{Self})과 보행 시 받게 되는 저항력($\mathbf{F}_{Resistance}$)의 차이
- $\mathbf{F}_{Penalty}$: 장애물을 회피하려는 힘, 심리적인 외력
- $\mathbf{F}_{Flocking}$: 집단 행동에 의한 영향이 힘으로 고려됨, 심리적인 외력
- $\mathbf{F}_{Contact}$: 접촉하여 작용하는 힘, 물리적인 외력
- $\mathbf{F}_{Incline}$: 선박의 경사에 의해 작용하는 힘, 물리적인 외력

승객끼리 서로 마주 서는 경우나 비껴가는 경우의 회전에 관한 자세를 고려하기 위해 식 (5)과 같이 승객의 질량 관성 모멘트(I), 각가속도($d^2\theta(t)/dt^2$)와 승객에 작용하는 모멘트의 관계식을 고려하였다 (Korhonen & Hostikka, 2009). 이 때, 승객에 작용하는 모멘트는 식 (6)와 같다.

$$I \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = M_{Total}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t) \quad (5)$$

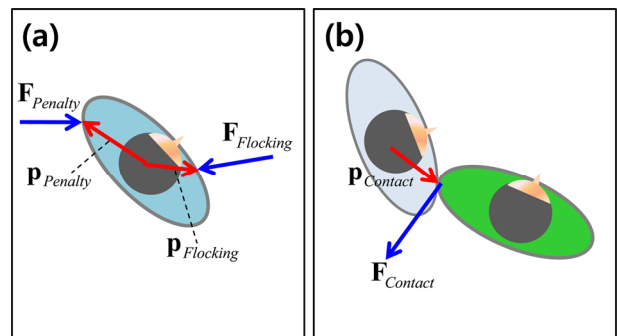


Fig. 2 Moment arm for considering the rotation of passenger: (a) moment arms for the penalty and flocking forces, (b) moment arm for the contact force

$$M_{Total}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t) = \mathbf{p}_{Penalty} \times \mathbf{F}_{Penalty}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{p}_{Flocking} \times \mathbf{F}_{Flocking}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t) + \mathbf{p}_{Contact} \times \mathbf{F}_{Contact}(\mathbf{x}, t) \quad (6)$$

회전 자세를 표현하기 위한 moment arm(p)은 Fig. 2와 같이 표현된다. 각각의 승객에 작용하는 물리적인 외력인 $\mathbf{F}_{Contact}$ 의 경우에는 접촉하는 점과의 거리가 moment arm이 되며, 물리적으로 접촉하지 않고 작용하는 $\mathbf{F}_{Penalty}$ 와 $\mathbf{F}_{Flocking}$ 은 신체 변경에 작용점을 설정하여 moment arm을 계산한다.

4.2 선박의 경사로 인한 물리적인 외력

승객은 선박이 경사진 상태에서 이동할 때, Fig. 1과 같이 선박경사에 의한 힘($\mathbf{F}_{Incline}$)을 받게 된다. 일반적인 물체의 경우 경사가 낮은 방향으로 운동을 할 때, 경사진 방향으로 더 빠르게 운동하게 된다. Gong (2003)은 승객이 경사가 낮은 방향으로 보행할 경우, 보행 속도가 증가하도록 선박 경사에 의한 힘을 고려하였다. 하지만, 선박의 경사를 고려한 실험 결과, 승객은 경사가 낮은 방향의 경우와 높은 방향의 경우 모두 보행 속도가 감소함을 알 수 있다 (Meyer-König, et al., 2007). 따라서, 본 논문에서는 경사에 의한 외력을 보행 방향의 반대 방향으로 작용하도록 식 (7) 같이 고려하였다.

$$\mathbf{F}_{Incline} = \mu(\alpha) \cdot m\mathbf{g} \cdot \sin\alpha \quad (7)$$

여기서 m 은 승객의 질량, \mathbf{g} 는 중력 가속도이다. α 는 선박의 경사각이다. $\mu(\alpha)$ 는 경사에 의한 외력과 경사에 의한 보행 속도 실험 결과를 보정하기 위해 도입된 계수이다. Gong (2003)은 μ 를 상수의 값으로 가정하였지만, 본 논문에서는 경사각 α 의 함수로 가정하였다. 선박의 자세에 대해 heel과 trim이 동시에 발생할 경우에는 각각의 방향으로 경사에 의한 외력을 고려한다.

4.3 경사에 의한 외력과 선박 경사에 의한 보행 속도 실험 결과 사이의 correction factor

Meyer-König, et al. (2007)은 선박 경사에 의한 보행 속도의 영향에 대해 각 기관에서 실험한 데이터를 종합하여, 선박의 경사가 승객의 보행 속도에 주는 영향을 보정 계수 그래프로써 도출하였다. 본 논문에서는 Meyer-König 등이 제시한 보정 계수 그래프를 참고하여, 승객 모델에 작용하는 중력($m\mathbf{g}$)과 경사에 의해 작용하는 외력($\mathbf{F}_{Incline}$) 간의 보정 계수 $f(\alpha)$ 를 경사각 α 의 함수로 나타내었다.

Gong이 제안한 식 (7)에서 보정 계수 $\mu(\alpha)$ 와 $\sin\alpha$ 는 모두 경사각 α 에 관한 함수임을 고려하여, 이 두 항을 모두 포함하는

경사 외력 보정 계수 $f(\alpha)$ 를 도입하여, 다음 식(8)과 같이 표현한다.

$$\mathbf{F}_{Incline} = f(\alpha) \cdot m\mathbf{g} \quad (8)$$

Sharp 등의 실험 결과에 따르면, 선박의 경사가 30도 이상 기울기 시 승객은 더 이상 보행할 수 없다. 이 실험 결과와 Meyer-König 등의 보정 계수 그래프를 이용하여 $f(\alpha)$ 를 다항식으로 구하였다. 경사가 높은 방향으로의 $f(\alpha)$ 는 식 (9), 경사가 낮은 방향으로의 $f(\alpha)$ 는 식 (10)과 같으며, 이를 그래프로 나타내면 Fig. 3과 같다.

$$f(\alpha) = 0.001003e^{-0.1558\alpha} \quad (9)$$

$$f(\alpha) = 0.004258e^{0.1077\alpha} \quad (10)$$

5. 손상 선박의 자세를 고려한 승객 탈출 시뮬레이션 프로그램의 개발과 검증

5.1 손상 선박의 자세를 고려한 승객 탈출 시뮬레이션 프로그램의 개발

본 논문에서 구현한 프로그램의 구성도는 Fig. 4와 같다. 먼저 Phase 1에서 손상 선박의 초기 자세를 계산한다. 계산된 자세는 Phase 2에서 물리적인 외력으로 고려하여 매 단위시간마다 승객이 탈출하는 위치와 속도를 계산한다. 승객이 모두 탈출하면 최종 시간을 확인한다.

5.2 경사로 인한 물리적인 외력을 고려한 보행 속도 시뮬레이션 결과와 실험 결과의 비교 검증

식 (9), (10)을 이용하여 선박 경사에 의한 외력을 고려한 승객 탈출 시뮬레이션을 수행하였으며, 이를 통해 제안한 보정 계수를 검증하였다. Fig. 5와 같이 1명의 승객이 길이 40m의 통로를 보행할 때, 승객의 평균 보행 속도를 시뮬레이션 하였다. 이 때, 힘은 \mathbf{F}_{Des} , $\mathbf{F}_{Incline}$ 만을 고려하였으며, 직진 운동만을 대상으로 하기에 승객의 회전 자세를 고려하기 위한 모멘트는 포함시키지 않았다.

본 논문에서 개발한 프로그램을 이용하여 시뮬레이션 한 결과를 관련 연구의 실험 결과와 비교하였으며, 그 결과는 Table 2와 같다. Table 2에서 볼 수 있듯이 시뮬레이션 결과가 실험 결과의 보행 속도와 5% 이하의 오차를 보이는 것을 확인할 수 있다. 실험 결과와 시뮬레이션 결과의 오차는 기존의 실험 데이터와 이를 회귀 분석하여 도출한 함수 간의 오차에 의한 것으로 파악된다.

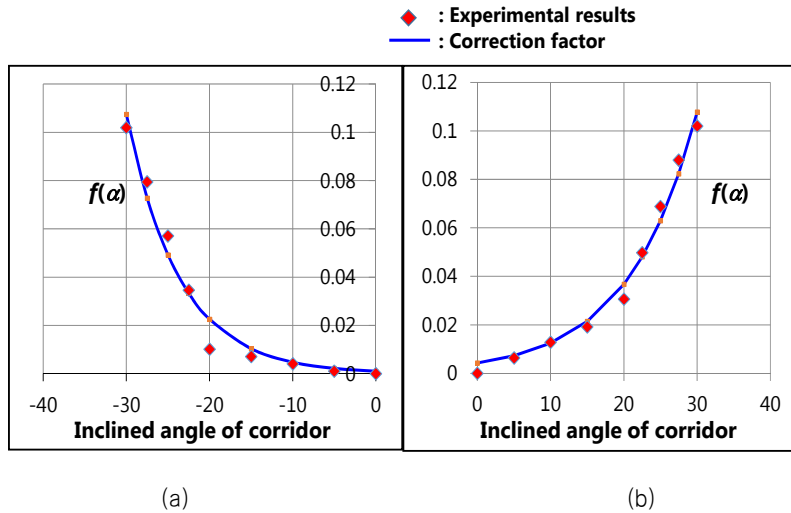


Fig. 3 Correction factor $f(\alpha)$ for the inclination force: (a) correction factor to the direction of downward, (b) correction factor for the direction of upward

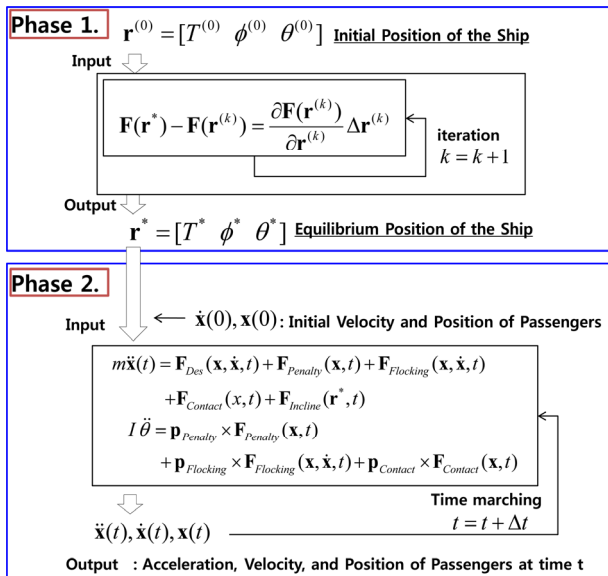


Fig. 4 Configuration of the proposed program for calculating the position and orientation of damaged ship



Fig. 5 Test case for the verification of the proposed algorithm

5.3 선박의 경사를 고려한 승객 탈출 시뮬레이션 프로그램 검증

본 논문에서 개발한 승객 탈출 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 IMO MSC/Circ. 1238. Annex 3에서 제시한 11가지 test problem을 구현하고, 경사가 없는 경우에 각 요구 조건을 만족하

Table 2 Comparison between the experimental results in the related works and the calculating results using the program developed in this paper

Inclined angle (°)	Average walking velocity		Difference
	Experiment	Simulation	
-25	0.44	0.494	5.0%
-15	0.93	0.898	-3.2%
-5	0.99	0.978	-1.2%
0	1	1	0
5	0.938	0.928	-1.0%
15	0.812	0.789	-2.3%
25	0.375	0.383	0.8%

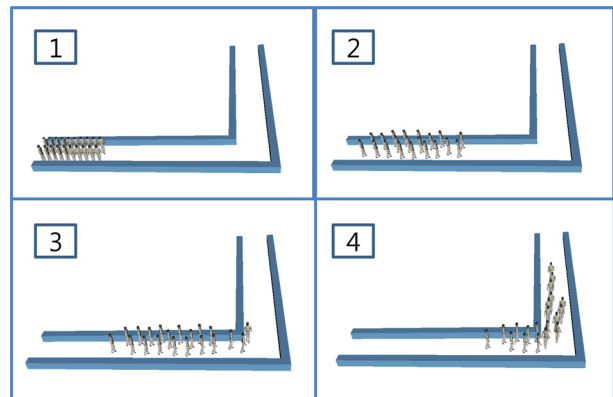


Fig. 6 IMO test problem 6 : rounding corners

는지 확인하고, 경사가 있을 경우 test problem의 목적 완료 시간이 어떻게 변화하는지 확인하였다. $F_{Penalty}$, $F_{Flocking}$, $F_{Contact}$ 등의 승객에 작용하는 힘을 모두 고려하고, 승객의 회전 자세를 계산하기 위해 모멘트도 고려하였다.

Fig. 6은 IMO Test problem 6에 해당하는 내용으로써, 같은 복도에서 꺾인 통로를 통해 이동하는 20명의 사람들이 경계(벽)를 통과하지 않고 성공적으로 목적지까지 도달하는 것을 목표로 한다. IMO test problem 6에 대해 경사에 의한 영향을 시뮬레이션 하였고, 그 결과는 Table 3과 같다. Table 3에서 볼 수 있듯이 경사각이 증가함에 따라 20명 모두 통로를 빠져나가는 데 소요되는 시간이 증가함을 알 수 있다.

Table 3 Duration of the simulation according to the angles of heel and trim

Heel angle (°)	Trim angle (°)	Simulation time (sec)	Increment of simulation time (%)
0	0	18.42	-
0	10	20.98	13.9%
0	20	22.72	20.5%
10	0	20.16	7.7%
20	0	24.26	29.9%
10	10	22.18	15.5%
20	20	28.18	44.0%

6. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 손상 선박의 정적 평형 자세를 구하는 방정식을 유도하고, 선박 자세 변화에 관한 힘과 모멘트의 미분 계수를 해석적으로 구하였다. 이를 이용하여 손상 선박의 자세를 계산하고, 계산된 선박의 경사는 승객 탈출 시뮬레이션에서 승객에 작용하는 물리적인 외력으로 고려하였다. 경사를 고려한 보행 속도 실험 결과를 이용하여 경사에 의한 물리적인 외력에 대한 보정 계수를 경사각에 대한 함수로 나타내었다. 그리고 제안한 경사 외력을 고려하여 가속도 기반 모델을 기반으로 승객 탈출 시뮬레이션 한 결과가 관련 연구의 실험 결과와 비교하여 유사함을 확인하였다. 향후에는 인체 동역학 모델을 바탕으로 승객의 보행 과정을 역학 기반으로 모델링하고, 이를 여객선 승객 탈출 시뮬레이션에 반영할 예정이다. 또한 이를 적용한 시뮬레이션 결과를 보행 평면의 변화에 따른 승객의 이동 속도 실험 결과와 비교하여 검증할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 (a) 대우조선해양(주), (b) 지식경제부 산업원천기술개발사업(10035331, 시뮬레이션 기반의 선박 및 해양플랜트 생산 기술 개발), (c) 서울대학교 공학연구소, (d) 서울대학교 해양

시스템공학 연구소의 지원으로 이루어진 연구 결과의 일부임을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

Choi, J. et al., 2010. Development of an Evacuation Time Calculation Program for Passenger Ships Based on IMO Guidelines, MSC.1/Circ.1238. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(5), pp.719-724.

Choi, J. Lee, D.G. & Park, B.J., 2007. A Study on the Analysis and Application of the Fire Simulation Tools for Ships. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(2), pp.83-92.

Galea, E.R. Gwynne, S. Lyster, C. & Glen, I., 2003. Analysing the Evacuation Procedures Employed on a Thames Passenger Boat using the maritimeEXODUS Evacuation Model, *Fire Technology*, 39(3), pp. 225-246.

Gong, S.C., 2003. *A study on developing ship evacuation dynamic model*. Master Thesis. Seoul National University.

Guarin, L. et al., 2004. Fire and flooding risk assessment in ship design for ease of evacuation. *The 2nd International Conference on Design for Safety*, Sakai, Japan, 28-30 October 2004.

Helbing, D. Farkas, I.J. Molnar, P. & Vicsek, T., 2001. Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations. *Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Duisburg, Germany, 4-5 April 2001, pp.21-58.

Helbing, D. Farkas, I. & Vicsek, T., 2000. Simulating Dynamical Features of Escape Panic. *Nature*, 407, pp.487-490.

IMO, 2007. *Guidelines for Evacuation Analysis For new and Existing Passenger Ship*, IMO MSC/Circ. 1238.

Jeong, C.Y. Park, K.P. Ha, S. & Lee, K.Y., 2010. Advanced evacuation analysis simulation for passenger ship with 3DOF dynamic model of human motion in 2 dimension. *Proceedings of the Society of CAD/CAM Engineers Conference*, Pyeongchang, South Korea, 27-29 January 2010, pp.69-76.

Kim, H.T. Lee, D.G. & Park, J.H., 2001. A review of simulation for human escape on shipboard. *Proceedings of 2001 Spring Conference of the Korea Society For Simulation*, Seoul, South Korea, 12 May 2001, pp.135-140.

Korhonen, T. & Hostikka, S., 2009. Fire Dynamics Simulator With Evacuation FDS+Evac, *Technical Reference and User's Guide*, VTT Research Notes.

Ku, N.K., 2012. *Dynamic analysis and control of heave compensation system for offshore drilling operation based on multibody dynamics*. Doctoral Thesis. Seoul National University.

Meyer-König, T. Valanto, P. & Povel, D., 2007. Implementing ship motion in AENEAS – Model development and first results, *Pedestrian and evacuation dynamics 2005*, pp.429-441.

Park, K.P. Ha, S. Cho, Y.O. & Lee, K.Y., 2010. Advanced Evacuation Analysis for Passenger Ship Using Penalty Walking Velocity Algorithm for Obstacle Avoid. *Journal of the Korea Society for Simulation*, 19(4), pp.1-9.

Schreckenberg, M. Meyer-König, T. & Klupfel, H., 2001. Simulating mustering and evacuation processes onboard passenger vessels; model and applications. *International Symposium on Human Factors On Board*, Bremen, Germany, 19-21 September 2001.

Sharp, G. Galea, E.R. & Gwynne, S., 2003. Critical review on model of evacuation analysis, *FSEG & Greenwich*.

Vassalos, D. et al., 2001. A mesoscopic model for passenger evacuation in a virtual ship-sea environment and performance based evaluation. *Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Duisburg, Germany, 4-5 April 2001.



하 슬



조윤옥



구남국



이규열



노명일