한국시뮬레이션학회 논문지
Vol. 20, No. 4, pp. 149-155 (2011. 12)

집단 행동을 나타내는 Cellular Automata 모델을 사용한 여객선 승객 탈출 분석

차주환[1] · 하 솔[2†] · 이규열[3]

Evacuation Analysis for a Passenger Ship Using a Cellular Automata Model with Group Behavior

Ju-Hwan Cha · Sol Ha · Kyu-Yeul Lee

ABSTRACT

This paper presents simulations of advance evacuation analysis using a cellular automata model for passenger behavior in an emergency of passenger ship. The proposed cellular automata model divides the space in a uniform grid called "cell." Each passenger is located in a cell and moves to another cell according to a set of local rules assumed to be associated with the individual and crowd behaviors of the passengers. To verify the usefulness of the proposed cellular automata model, 11 tests, all of which are specified in International Maritime Organization Maritime Safety Committee/ Circulation 1238 (IMO MSC/Circ. 1238), were implemented, and it was confirmed that all the requirements of these tests had been met.

Key words : Advanced Evacuation Analysis, Passenger Ship, Cellular Automata, Crowd Behavior

요 약

본 논문에서는 여객선의 비상 상황에서의 승객 탈출 시 승객의 집단 행동을 고려한 cellular automata 모델을 제안하였다. 승객이 이동 가능한 영역을 규칙적인 격자 형태의 cell들로 표현하고, 한 명의 승객이 일반적으로 차지하는 공간의 크기를 cell의 크기로 정의한다. 각 cell은 이웃 cell들의 상태를 고려하여 정해진 규칙에 따라 승객이 이동함으로써 매 단위 시간마다 cell의 상태가 업데이트 된다. 규칙은 탈출구로의 이동 규칙과 집단 행동 규칙의 두 가지로 구성되어 있다. 첫째, 탈출구로의 이동 규칙을 정의하기 위해 각 cell에는 탈출구로의 최단 거리가 저장되어 있고, 인접한 8개의 이웃 cell에 저장된 거리 값들을 비교하여 거리 값이 작아지는 방향으로 승객이 이동한다. 둘째, 집단 행동 규칙은 응집(cohesion), 분리(separation), 정렬(alignment) 행동 규칙으로 구성되어 있다. 이러한 승객의 집단 행동을 규칙화 한 cellular automata 모델을 사용하여 International Maritime Organization, Maritime Safety Committee / Circulation 1238(IMO MSC/Circ. 1238) 기반의 여객선 승객 탈출 분석을 수행하여 승객의 이동 경로 및 탈출 시간을 계산하였다.

주요어 : 승객 탈출 분석, 여객선, Cellular Automata, 집단 행동

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 필요성

국제 해사 기구(International Maritime Organization)에서는 여객선 설계 시 비상 상황에서의 승객 탈출에 대한 규정인 Maritime Safety Committee/Circulation 1238(IMO MSC/Circ. 1238)을 마련하고 있으며, 이 규정을 만족할 것을 요구하고 있다(International Maritime Organization,

접수일(2011년 4월 28일), 심사일(1차 : 2011년 9월 9일, 2차 : 2011년 12월 21일), 게재 확정일(2011년 12월 22일)
[1] 목포대학교 해양시스템공학과
[2] 서울대학교 대학원 조선해양공학과
[3] 서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학연구소
주 저 자 : 차주환
교신저자 : 하 솔
E-mail; hasol81@snu.ac.kr

2007). 이를 위해 컴퓨터를 이용한 승객 탈출 분석이 널리 사용되고 있다. 여객선은 수백 개의 객실과 다양한 공용 공간, 폭이 좁은 복도로 구성되어 있고, 각 공간은 매우 밀집하여 배치되어 있기 때문에, 비교적 공간이 크고 여유가 있는 육상 건물에 비해 복잡한 분석이 요구된다. 따라서 여객선 승객 탈출 분석에는 정확도뿐만 아니라 빠른 계산 속도와 계산의 안정성이 요구되고 있다. 계산 속도 및 안정성 향상을 위해서는 승객의 탈출 행동 특성을 단순하면서도 일괄적으로 적용할 수 있는 방법이 필요하다.

1.2 관련 연구 현황

승객이 이동 가능한 영역을 표현하는 방식에 따라 승객 탈출 분석 모델을 continuous 모델, fine network 모델, coarse network 모델의 세 가지로 구분할 수 있다(Kuligowski 등, 2005; Helioevarra, 2007). Continuous 모델에서는 승객의 이동 영역을 연속적인 실수 좌표계로 나타내기 때문에 승객의 위치를 매우 정확하게 나타낼 수 있지만, 계산량이 많고 계산 시간이 오래 걸린다는 한계점이 있다. Fine network 모델에서는 승객의 이동 영역을 이산화된(discrete) 격자 구조의 cell들로 나타내기 때문에 cellular automata 모델이라고 하며, 정형화된 규칙을 모든 cell에 적용시켜 승객을 이동시키기 때문에 계산 시간이 비교적 빠르면서도 어느 정도 정확한 분석을 수행할 수 있다. Coarse network 모델에서는 중요한 지점을 노드로 정의하고 그 사이를 승객이 이동하도록 함으로써, 매우 빠른 계산이 가능하지만 승객의 위치를 정확하게 표현하기 어렵다는 한계점이 있다.

한편, 승객들은 주위 사람들과 함께 집단으로 행동하려는 경향이 있기 때문에, 승객 탈출 분석 시 이를 고려해야 한다. 집단이 있는 위치로 이동하려는 응집(cohesion) 행동, 집단이 움직이는 방향으로 이동하려는 정렬(alignment) 행동, 집단 안의 승객 간에 일정 간격을 유지하려는 분리(separation) 행동으로 집단 행동을 구분할 수 있다(Reynolds, 1987).

Evi는 대표적인 여객선 승객 탈출 분석 모델로서 continuous 모델로 표현되어 있으며, 집단 간에는 동일한 속도로 이동하는 특성을 통해 개략적인 응집, 정렬 행동을 나타내고 있으며, 일정 공간의 승객 밀도를 계산하여 밀도가 큰 경우에는 속도를 줄이는 특성을 통해 분리 행동을 나타내고 있다(Vassalos 등, 2001).

FDS+Evac은 연기 및 화재 전파 시뮬레이션을 고려한 빌딩 및 여객선 승객 탈출 분석 모델로서 continuous 모델로 표현되어 있으며, 집단의 중심으로 이동하게 하는 외력을 반영하여 응집 행동을 나타내며, 집단 안의 승객 간에 거리를 계산하여 일정하게 유지하려는 힘을 반영함으로서 분리 행동을 고려하고 있으나, 정렬 행동은 고려하지 않았다(Korhonen, 2009).

MaritimeExodus는 fine network 모델을 사용한 여객선 승객 탈출 분석 모델이다. 탈출구까지의 거리를 각 cell에 저장하여 potential map을 만들어 놓고, 그 값이 작아지는 방향으로 이동하려는 규칙을 정의하였다(Owen 등, 1996; Galea 등, 2003). 그리고 집단 간에 어른이 어린이를 돌보는 특성을 통해 응집 및 정렬 행동을 나타내었으나 분리 행동에 대한 고려는 하지 않았다.

Burstedde 등(2001)과 Schadschneider 등(2002)은 탈출구로 향하는 속도를 고려하기 위한 static floor field와 집단 행동을 나타내기 위해 승객의 이동 궤적에 흔적을 남기는 dynamic floor field를 고려하여 cellular automata 모델을 정의하여 단순한 형태의 객실에 대해 적용하였다.

정채윤 등(2009)은 continuous 모델 기반으로 장애물을 고려한 panelty walking velocity 알고리즘과 응집, 정렬, 분리의 집단 행동 특성을 적용하여 여객선 승객 탈출 분석을 수행하였으며, 박광필 등(2010)은 정채윤 등(2009)의 연구에 승객의 회전 자세를 고려하였고, 조윤옥 등(2010b)은 손상 선박의 자세를 고려하였다.

본 논문에서는 정채윤 등(2010)의 연구를 기반으로 계산 속도를 향상시키기 위해 cellular automata 모델을 제안하였으며, 응집, 정렬, 분리의 집단 행동 특성을 규칙화하였고, 이를 MSC/Circ. 1238에 적용하여 여객선 승객 탈출 분석을 수행하였다.

2. Cellular Automata 모델

본 논문의 cellular automata 모델에서는 승객이 이동 가능한 영역을 규칙적인 격자 형태의 cell들로 표현하고, 한 명의 승객이 일반적으로 차지하는 공간의 크기인 0.4 m × 0.4 m를 cell의 크기로 정의하였다(Burstedde 등, 2001). 한 개의 cell에는 한 명의 승객만이 위치할 수 있다. 각 cell에는 "승객", "장애물", "비어있음"의 3가지 상태가 정의되어 있다. 승객의 이동 규칙은 탈출구로의 이동 규칙과 집단 행동 규칙의 두 가지로 구성되어 있으며 이에 대한 자세한 설명은 3, 4장에서 언급한다.

탈출구에서 가장 가까운 cell부터 먼 cell 순서로 규칙을 실행한다. 우선, 해당 cell의 상태가 "비어있음"일 경우(그림 1의 ①), 주위 8개의 이웃 cell들 중 상태가 "승객"이고, 이동 방향이 해당 cell인 이웃 cell들을 선택한다(그

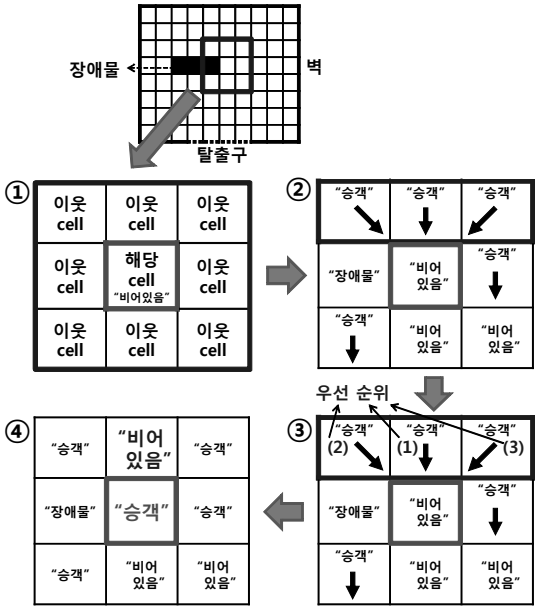

그림 1. 해당 cell과 이웃 cell들의 상태 업데이트 예시

림 1의 ②). 선택한 이웃 cell들 중 탈출구로의 이동 규칙 값과 집단 행동 규칙 값을 비교하여 우선 순위가 가장 높은(그림 1의 ③) 이웃 cell의 상태를 "비어있음"으로 업데이트 하고, 해당 cell의 상태를 "승객"으로 업데이트 한다(그림 1의 ④). 이렇게 함으로써 한 cell에 여러 명의 승객이 위치하는 현상이 발생하지 않으면서 가장 우선 순위가 높은 승객이 먼저 이동할 수 있게 하였다. 승객의 평균 이동 속도를 약 1.3 m/s로 가정하고(Burstedde 등, 2001), 약 0.3초의 단위 시간마다 위의 과정을 반복하여 모든 cell의 상태를 업데이트 한다.

3. 탈출구로의 이동 규칙

모든 cell에는 그림 2와 같이 각 cell의 중심으로부터 탈출구로의 최단 거리가 저장되어 있다. 최단 거리는 조윤옥 등(2010a)에서 사용된 보행 방향 포텐셜 함수를 통해 계산되었다. 최단 거리는 지형에 관련된 값이기 때문에, 매 단위 시간마다 계산되는 것이 아니라 초기에 한 번만 계산된다. 상태가 "승객"인 해당 cell의 이웃 cell들에 저장되어 있는 최단 거리 값을 사용하여 탈출구로의 이동 규칙 값을 정의한다.

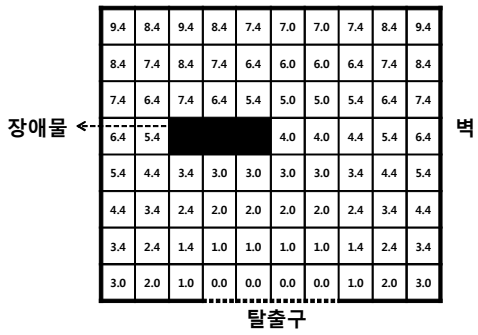

그림 2. 각 cell에 저장되어 있는 탈출구로의 최단 거리 예시

4. 집단 행동 규칙

각 승객의 위치에서 일정 반경 이내에 위치한 승객을 집단으로 정의한다. 반경은 승객 탈출 분석 이전에 상수로 정해지며, 이에 따라 집단에 속하는 cell을 미리 정의해 놓는다. 본 논문에서는 집단에 속하는 cell들 중에서 상태가 "승객"인 cell들을 집단 cell이라고 정의한다. 집단 행동 규칙은 응집, 분리, 정렬 행동 규칙으로 구성되어 있고, 세 규칙 값에 각각 가중치를 곱하여 더한 값을 집단 행동 규칙 값으로 정의한다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$Crowd_{ij} = K_S \cdot S_{ij} + K_C \cdot C_{ij} + K_A \cdot A_{ij}$$

여기서, 이웃 cell (i, j)의 S_{ij}, C_{ij}, A_{ij}는 각각 분리, 응집, 정렬에 대한 행동 규칙 값을 의미하며, K_S, K_C, K_A는 각각의 행동 규칙에 대한 가중치를 의미한다.

4.1 응집 행동 규칙

각 cell에는 그림 3과 같이 자신의 집단 cell들의 상대 위치의 평균 값을 저장하고 이를 "집단 위치"라고 정의하며, 이 값을 매 단위 시간마다 업데이트 한다. 상태가 "승객"인 해당 cell의 이웃 cell들 중에서 "집단 위치"에 가장 가까운 cell부터 먼 cell 순서대로 응집 행동 규칙 값을 정의한다.

4.2 분리 행동 규칙

각 cell에는 그림 4와 같이 자신의 집단 cell들의 상대 위치에 반비례하는 반대 방향으로 평균 위치를 저장하고 이를 "집단 반대 위치"라고 정의하며, 이 값을 매 단위 시

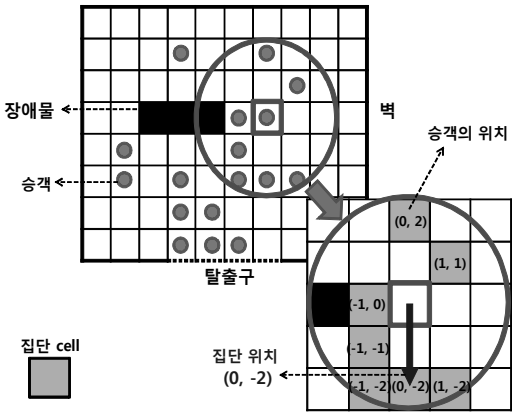

그림 3. 응집 행동 규칙을 위한 "집단 위치" 계산 예시

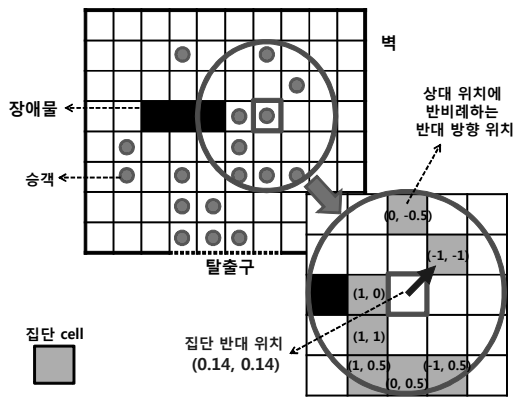

그림 4. 분리 행동 규칙을 위한 "집단 반대 위치" 계산 예시

간마다 업데이트 한다. 상태가 "승객"인 해당 cell의 이웃 cell들 중에서 "집단 반대 위치"에 가장 가까운 cell부터 먼 cell 순서대로 분리 행동 규칙 값을 정의한다.

4.3 정렬 행동 규칙

상태가 "승객"인 모든 cell에는 그림 5와 같이 그 승객이 이전 단위 시간에 있었던 상대 위치를 저장하고, 이를 "승객 이전 위치"라고 정의한다. 각 cell에는 자신의 집단 cell들의 "승객 이전 위치"의 평균 값을 저장하고 이를 "집단 이전 위치"라고 정의하며, "승객 이전 위치"와 "집단 이전 위치"를 매 단위 시간마다 업데이트 한다. 상태가 "승객"인 해당 cell의 이웃 cell들 중에서 "이전 집단 위치"의 반대 방향에 가장 가까운 cell부터 먼 cell 순서로 정렬 행동 규칙 값을 정의한다. 이 값은 backward difference 방법을 사용하여 집단에 속한 승객들의 속도를 계산한 것과 같은 의미를 갖는다.

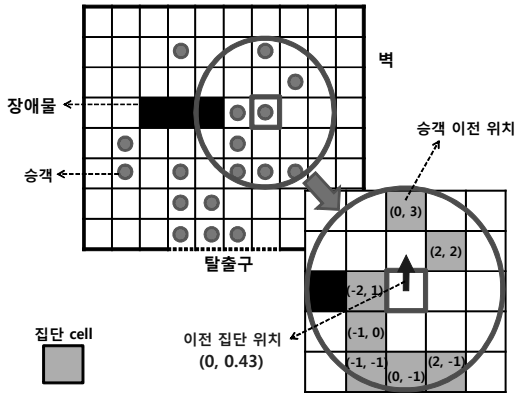

그림 5. 정렬 행동 규칙을 위한 "이전 집단 위치" 계산 예시

표 1. IMO MSC/Circ.1238 Annex 3의 탈출 분석 소프트웨어 검증 항목

1. Component testing	
Test 1	Maintain set walking speed in corridor
Test 2	Maintain set walking speed up staircase
Test 3	Maintain set walking speed down staircase
Test 4	Exit flow rate
Test 5	Response time
Test 6	Rounding corners
Test 7	Assignment of population demographic parameters
2. Qualitative verification	
Test 8	Counterflow - two rooms connected via a corridor
Test 9	Exit flow : crowd dissipation from a large public room
Test 10	Exit tour allocation
Test 11	Staircase

5. 여객선 승객 탈출 분석 예제

국제해사기구는 IMO MSC/Circ.1238 Annex 3 탈출 시뮬레이션 도구의 검증을 위한 지침 (guidance on validation/verification of evacuation simulation tools)을 발표하여 소프트웨어를 테스트 할 수 있도록 하였다. Annex 3에 있는 탈출 소프트웨어 검증은 표 1과 같이 크게 2가지 항목으로 분류되는 11가지의 구체적인 시험 문제들로 구성되어 있다.

본 논문에서는 제안한 cellular automata 기법의 기능을 확인하기 위해 11가지의 시험 문제를 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. 다음은 시험 문제 중 시험 문제 6에 대해 구현 및 분석한 내용이다.

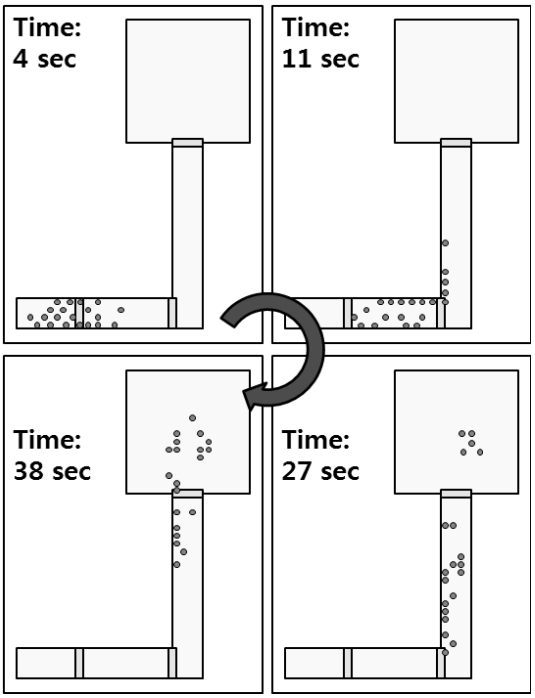

그림 6. 시험 문제 6: 20명의 승객이 꺾인 복도를 통과하여 탈출

5.1 시험 문제 6의 구현 및 분석

시험 문제 6은 그림 6과 같이 20명의 승객이 꺾인 복도를 따라 목적지까지 탈출하는 과정을 확인하는 문제이다. 그림 6에서 보는 것과 같이 20명의 승객이 벽을 통과하거나 겹치지 않으면서 목적지까지 원활히 탈출하는 것을 확인하였다.

5.2 IMO MSC/Circ.1238 Annex 3의 탈출 분석 소프트웨어 검증 항목 테스트 결과

IMO MSC/Circ.1238 Annex 3에서 제시하는 11개의 테스트 항목에 대해 시뮬레이션을 수행한 결과는 표 2와 같다. 시뮬레이션을 수행하고 결과를 분석하여 제안한 승객 모델이 각 시험 문제의 요구 조건을 모두 만족하는 것을 확인하였다.

5.3 속도 기반 승객 모델과의 단위 계산 시간 비교

본 논문에서는 계산 속도를 향상시키기 위해 cellular automata를 이용한 승객 모델을 제안하였다. IMO MSC/Circ.1238 Annex 3에서 제시한 검증 사례 중 승객의 수가 많은 Test 8, 9를 통해 속도 기반 승객 모델(정채윤 등, 2010)와의 계산 시간을 표 3과 같이 비교하였다. 비교 결과 계산 시간이 약 1.5~2배 정도 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

표 2. IMO MSC/Circ. 1238 Annex 3의 테스트 항목에 대한 시뮬레이션 결과

항목	시뮬레이션 결과 (탈출 소요 시간)	만족 여부
Test 1	40 sec	만족
Test 2	10 sec	만족
Test 3	10 sec	만족
Test 4	160 sec	만족
Test 5	95 sec	만족
Test 6	40 sec	만족
Test 7	-	만족
Test 8	no person: 81 sec 10 people: 91 sec 50 people: 131 sec 100 people: 209 sec	만족
Test 9	4 doors: 253 sec 2 doors: 512 sec	만족
Test 10	36 sec	만족
Test 11	135 sec	만족

표 3. 속도 기반 승객 모델(정채윤 등, 2010)와 본 논문에서 제시한 승객 모델의 계산 시간 비교

항목	단위 계산 시간 (시뮬레이션 시간 0.1초 기준)	
	정채윤 등, 2010	본 논문
Test 8 (승객 수: 1,000명)	0.530 sec	0.231 sec
Test 9 (승객 수: 200명)	0.045 sec	0.031 sec

6. 결론 및 향후 연구 계획

본 논문에서는 여객선의 비상 상황에서 승객 탈출 과정을 분석하기 위해 cellular automata 모델을 사용한 승객 탈출 시뮬레이션을 수행하였다. 제안하는 cellular automata 모델은 승객의 탈출 과정을 묘사하기 위해 탈출구로의 이동 규칙과 집단 행동 규칙의 두 가지 규칙을 포함한다. 제안한 cellular automata 모델은 IMO MSC/Circ.1238 Annex 3에서 제시하는 11개의 시험 문제를 이용하여 승

객 탈출 분석 시뮬레이션에 필요한 기본 기능을 검증하였다. 향후에는 실제 선박의 전체 구획에 대한 승객 탈출 과정의 시뮬레이션을 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 a) 대우조선해양, b) 지식경제부 산업원천기술개발사업(10035331, 시뮬레이션 기반의 선박 및 해양플랜트 생산기술 개발), c) 국방과학연구소 수중운동체기술특화센터 SM-11 과제 "수중 운동체의 체계/부체계 기능 및 성능 시뮬레이션을 위한 네트워크 기반의 가상 복합 시스템 모델 구조 연구", d) 2011년도 목포대학교 중형조선산업 지역혁신센터(RIC), e) 서울대학교 BK 21 해양기술인력양성사업단, f) 서울대학교 해양시스템공학 연구소, g) 서울대학교 공학연구소의 지원을 받아 연구되었음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 박광필, 조윤옥, 하솔, 이규열(2010), "평면상 승객의 회전 자세를 고려한 가속도 기반의 승객 탈출 분석 시뮬레이션", *한국CAD/CAM학회 논문집*, 제15권, 제4호, pp. 306-313.
2. 정채윤, 박광필, 하솔, 이규열(2010), "2차원 3자유도 인체 모델을 이용한 가속도 기반의 여객선 승객 탈출 분석 시뮬레이션", *2010년 한국CAD/CAM학회 학술대회 논문집*, pp. 69-76.
3. 정채윤, 하솔, 이규열, 박광필(2009), "장애물 회피에 Penalty Walking Velocity 알고리즘을 적용한 여객선 승객 탈출 시뮬레이션", *2009년도 한국시뮬레이션학회 추계학술대회*, 서울, pp. 152-160.
4. 조윤옥, 차주환, 구남국, 박광필, 함승호, 이찬영, 이규열(2010), "보행 방향 포텐셜 함수를 이용한 승객 탈출 최적 보행 방향 결정 및 탈출 시뮬레이션 구현", *2010년도 대한조선학회 추계학술대회*, 창원, pp. 646-653.
5. 조윤옥, 하솔, 박광필, 차주환, 이규열(2010), "손상 선박의 자세로 인한 물리적인 외력을 고려한 여객선 승객 탈출 시뮬레이션", *2010년도 대한조선학회 춘계학술대회*, 제주, pp. 860-868.
6. Burstedde, C., Klauck, K., Schadschneider, A., and Zittartz, J. (2001), "Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automation", *Physica A*, Vol. 195, pp. 507-525.
7. Galea, E.R., Lawrence, P., Gwynne , S., Filippidis, L., Blackshields, Sharp, D., G., Hurst, N., Wang, Z., and Ewer, J. (2003), "Simulating ship evacuation under fire conditions", *Proceeding of Second International Pedestrian and Evacuation Dynamics Conference*, CMS Press, Greenwich, pp. 159-172.
8. Helioevarra, S. (2007), *Computational Models for Human Behavior in Fire Evacuation*, Master's Thesis, Helsinki University of Technology.
9. International Maritime Organization (2007), *Guidelines for Evacuation Analysis For new and Existing Passenger Ship*, IMO MSC/Circ.1238.
10. Korhonen, T. and Hostikka, S. (2009), *Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+ Evac-Technical Reference and User's Guide*, VTT Technical Research Centre of Finland.
11. Kuligowski, E. D. and Peacock, R. D. (2005), *A review of building evacuation models*, Technical report, National Institute of Standards and Technology, Fire Research Division, Building and Fire Research Laboratory.
12. Owen, M., Galea, E., and Lawrence, P. (1996), "The EXODUS evacuation model applied to building evacuation scenarios", *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 65-84.
13. Reynolds, C. W. (1987), "Flocks, herds and schools; A distributed behavioral model", *Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 25-34.
14. Schadschneider, A., Krichner, A., and Nishinari, K. (2002), "CA Approach to Collective Phenomena in Pedestrian Dynamics", *Lecture Note in Computer Science*, Vol. 2493, pp. 239-248.
15. Vassalos, D., Kim, H. S., Christiansen, G., and Majumder, J. (2001), "A mesoscopic model for passenger evacuation in a virtual ship-sea environment and performance based evaluation", *Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics*.

차 주 환 (jhcha79@snu.ac.kr)

2002 서울대학교 조선해양공학과 학사
2004 서울대학교 대학원 조선해양공학과 석사
2008 서울대학교 대학원 조선해양공학과 박사
2008～2011 서울대학교 공학연구소 선임연구원
2011～현재 목포대학교 해양시스템공학과 전임강사

관심분야 : 선박설계, 최적설계, 모델링&시뮬레이션, 다물체계 동역학, 조선 전용 CAD/CAM, 음함수 모델링

하 솔 (hasol81@snu.ac.kr)

2003 서울대학교 조선해양공학과 학사
2003～현재 서울대학교 대학조선해양공학과 석박사통합과정

관심분야 : 모델링&시뮬레이션, 수중운동체(잠수함, 어뢰)

이 규 열 (kylee@snu.ac.kr)

1971 서울대학교 공과대학 조선공학과 학사
1975 독일 하노버 공과대학 조선공학 석사(Dipl.-Ing.)
1982 독일 하노버 공과대학 조선공학 박사(Dr.-Ing.)
1975～1983 독일 하노버 공과대학 선박설계 및 이론연구소, 주정부 연구원
1983～1994 한국기계연구원 선박해양공학연구센터, 선박설계, 생산자동화 연구사업(CSDP) 단장
1994～2000 서울대학교 공과대학 조선해양공학과 부교수
2000～현재 서울대학교 공과대학 조선해양공학과 교수

관심분야 : 최적 선박 설계, 형상 모델링, Offshore structure, Dynamics & control