Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety
Research Paper
Vol. 24, No. 5, pp. 519-526, August 31, 2018, ISSN 1229-3431(Print) / ISSN 2287-3341(Online) https://doi.org/10.7837/kosomes.2018.24.5.519

선박 화재시 승선자 피난동선예측을 위한 알고리즘 개발 기초연구

황광일*† · 조소형** · 고후상** · 조익순*** · 윤귀호*** · 김별****

* 한국해양대학교 기계공학부, ** Department of Mechanical and Industrial Engineering, Southern Illinois University Edwardsville,
*** 한국해양대학교 선박운항과, **** 한국해양대학교 대학원

Shipboard Fire Evacuation Route Prediction Algorithm Development

Kwang-Il Hwang*† · So-Hyung Cho** · Hoo-Sang Ko** · Ik-Soon Cho*** · Gwi-Ho Yun*** · Byeol Kim****

* Division of Mechanical Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea
** Department of Mechanical and Industrial Engineering, Southern Illinois University Edwardsville, Illinois 62026, USA
*** Department of Ship Operation, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea
**** Graduate school of Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

요 약 : 본 연구에서는 인명구조활동을 지원하기 위한 피난동선예측 알고리즘 개발의 첫 단계로 피난동선예측 알고리즘의 개념을 정립하고 그 타당성을 수치적으로 명확히 제시하였다. 제안하는 알고리즘은 평상시 선박내 모니터링 시스템으로부터 지속적으로 승객이동 데이터를 취득, 분석, 정형화하고, 재난발생시 이 데이터와 예측 툴을 활용해 도출한 승선자의 피난동선예측 정보를 구조자에게 제공하여 인명피해를 최소화시키는 프로세스로 요약할 수 있다. 피난훈련을 통해 피난특성 데이터를 취득하였고 이를 기존 인명피난예측 툴에 입력하여 피난특성을 예측한 결과, 예측 툴의 구조적 원인으로 인해 가시거리가 충분히 확보되고 피난경로를 충분히 숙지한 상황에서의 피난 시나리오(SN1)에서만 신뢰할 만한 예측결과가 도출되었다. 본 연구에서 제안하는 알고리즘의 타당성을 확인하기 위해 타 분야의 예측 툴을 사용하여 피난특성을 예측한 결과, 제안 알고리즘이 구현될 경우 평균피난시간예측값과 피난동선(지점경유)예측값이 각각 0.6~6.9%, 0.6~3.6% 범위의 오차에서 실측값과 매우 유사한 경향을 보였다. 향후 선내 모니터링 데이터를 분석하고 이를 활용한 예측성능이 우수한 피난동선예측 알고리즘을 개발할 계획이다.

핵심용어 : 선박화재, 인명안전, 모니터링 분석, 피난동선예측, 알고리즘

Abstract : *In this study, an algorithm to predict evacuation routes in support of shipboard lifesaving activities is presented. As the first step of algorithm development, the feasibility and necessity of an evacuation route prediction algorithm are shown numerically. The proposed algorithm can be explained in brief as follows. This system continuously obtains and analyzes passenger movement data from the ship's monitoring system during non-disaster conditions. In case of a disaster, evacuation route prediction information is derived using the previously acquired data and a prediction tool, with the results provided to rescuers to minimize casualties. In this study, evacuation-related data obtained through fire evacuation trials was filtered and analyzed using a statistical method. In a simulation using the conventional evacuation prediction tool, it was found that reliable prediction results were obtained only in the SN1 trial because of the conceptual and structural nature of the tool itself. In order to verify the validity of the algorithm proposed in this study, an industrial engineering tool was adapted for evacuation characteristics prediction. When the proposed algorithm was implemented, the predicted values for average evacuation time and route were very similar to the measured values with error ranges of 0.6-6.9% and 0.6-3.6%, respectively. In the future, development of a high-performance evacuation route prediction algorithm is planned based on shipboard data monitoring and analysis.*

Key Words : *Ship fire, Human safety, Monitoring analysis, Evacuation route prediction, Algorithm*

† Corresponding Author : hwangki@kmou.ac.kr, 051-410-4368

1. 서 론

국내에서만 최근 5년간 485건의 선박 화재와 폭발사고가 발생하였고 이로 인해 125명의 인명피해가 발생한 것으로 보고되었다(KMST, 2018). 선박은 통로의 폭이 좁고 높이가 낮으며 매우 길기 때문에 선내 화재발생 시 화재와 연기가 통로를 통해 매우 빠르게 확산되는 특징으로 인해 피난경로가 폐쇄되거나 많은 인원이 동일 경로 상에서 동시에 피난하기 어려운 상황이 발생한다. 또한 선박은 선박자체의 고유 운동과 분기점이 많은 복잡한 통로 구조로 이루어지기 때문에 피난이 쉽지 않은 구조이다.

인명안전을 위한 다양한 기술개발이 있었음에도 불구하고 선박 화재 상황에서의 인명구조활동지원을 위한 관련기술 수준은 아직 미흡한 실정이다. 현존하는 대부분의 인명피난예측 기술들은 다익스트라(Dijkstra) 알고리즘, A-Star 알고리즘, Floyd-Warshall 알고리즘 등과 같은 최단경로탐색법에 근거해 경로를 찾고 그에 따른 피난시간을 산출한다. 그런데 기존의 예측기술들은 일반 승객을 포함하는 모든 승선자들이 선내 모든 통로를 완벽하게 숙지하고 있으며, 분기점에서 경로선택의 갈등이 없고, 이동하고자 하는 방향 앞에 전개되어 있는 재난환경은 무시하고 통과한다는 등의 대전제에서 시작한다. 그러므로 기존의 인명피난예측 툴은 Hwang(2011; 2015)의 연구성과가 보여주는 것처럼 대전제가 만족되는 조건에서 에이전트(시뮬레이션 상에서 피난자를 표현하는 객체를 지칭)가 각 지점으로부터 안전한 목표지점까지 이동하는데 소요되는 안전피난요구시간(Required Safe Egress Time, RSET)을 산출하여 이를 안전피난허용시간(Available Safe Egress Time, ASET)과 비교함으로써 피난자의 안전성 혹은 피난성능 향상 여부를 판단하는 것을 목적으로 개발 및 활용되고 있다.

그러나 재난현장에서 구조자의 구난, 구조 활동에 제공되는 정보로써 기존 예측 툴을 활용해 승선자의 피난동선을 예측한 사례는 찾아보기 어렵다. 이는 Hwang et al.(2016; 2018)에 의해 수행된 사례가 있기는 하지만 선박 재난 유사환경에서의 다양한 인간행동 데이터 취득이 매우 어려워 예측 툴에 대입할 현실적인 데이터가 부족하고, 또한 전술한 바와 같이 기존 예측기술들이 피난시간 산출에 초점을 맞추었기에 재난상황 하에서 피난동선, 즉 피난자의 위치를 예측하는 기능이 포함되어 있지 않기 때문이다.

인명피난예측 툴이 구조활동에 활용되기 위해서는 예측 알고리즘이 시간축에 따른 재난의 전개상황과 피난자의 행동특성을 종합적으로 고려해 피난동선을 예측할 수 있어야 한다. 본 연구는 이를 위한 기술 개발의 첫 단계로써 피난동선예측 알고리즘의 개념을 정립하고 그 타당성을 수치적으로 명확히 제시하는 것을 목적으로 한다.

이에 본 연구에서는 제안하는 알고리즘 전반을 구체적으로 다루거나 제안하는 알고리즘을 구현하기 위한 예측 툴 개발 관련 내용 등을 논문의 범위 내에 포함하지 않는다.

2. 연구방법

2.1 피난동선예측 알고리즘의 기본 개념

Fig. 1은 본 연구에서 제안하는 인명안전 피난동선예측 알고리즘의 전반적인 개념을 제시한다. 이 알고리즘은 평상시에는 선박 내에 설치된 CCTV 등과 국내에서 개발 중인 여러 종류의 선내 위치인식 시스템을 통해 승선자의 행동 관련 데이터를 자동적으로 모니터링 하고 이를 주기적으로 통계기법으로 정형화한 데이터를 활용하여 선박의 재난대응 안전성을 점검하고 그 결과를 피드백하여 모니터링과 예측 툴의 문제점과 성능을 개선한다. 재난 발생 시에는 이를 활용하여 승선자의 피난동선을 시간축에 따라 예측하고, 도출된 결과를 구조자에게 제공함으로써 인명피해 최소화가 가능해 진다.

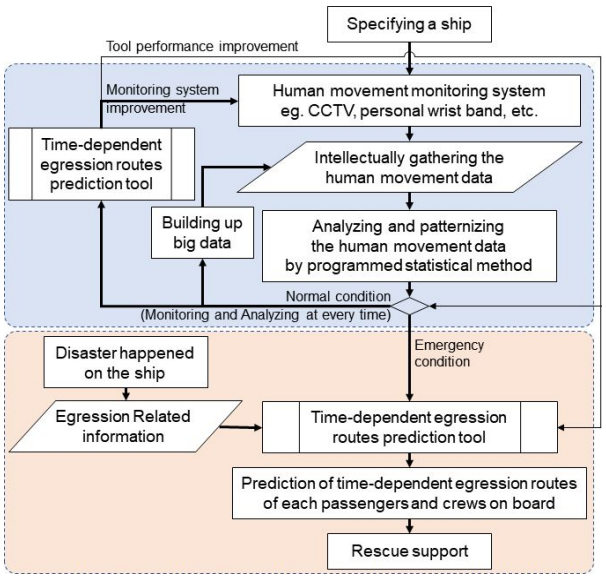

Fig. 1. Full concept flow diagram of proposed algorithm.

2.2 제안 개념의 타당성 검증방법

본 연구에서 제안하는 피난동선예측 알고리즘을 구현한 사례를 찾기 어려웠던 이유는 크게 두 가지로 볼 수 있다. 첫째는 모니터링 기술이 발달하였음에도 불구하고 현재 선박에 설치, 운영되고 있는 CCTV 등의 모니터링 시스템은 엔지니어링 측면에서의 데이터 취득보다는 승선자의 이동사실을 관찰하는 것이 주요 목적이기 때문에 지금까지는 이러한 시스템을 활용해 승선자의 데이터를 취득하고 이를 분석할 필요성이 없었다. 둘째는 기존의 인명피난예측 툴은 신조선의 안전성을 평가하는 것을 주요 목적으로 하였기 때문에 기존선의 피난성능향상을 위한 효율적이고 현실적인 피

난동선에 주목할 필요가 없었다.

본 연구에서는 다음과 같은 단계적 과정을 거쳐 본 연구에서 제안하는 알고리즘의 필요성과 타당성을 검증하였다.

본 연구에서 제안하는 알고리즘은 승선자의 이동상황을 모니터링하고 이 데이터를 통계적으로 가공한 정보를 활용함으로써 목적하는바 성과를 달성할 수 있다. 이에 가장 먼저, 제한된 실측공간을 설정하고 피관찰자(피난훈련 참가자)의 피난특성을 실측하였다. 이 과정에서 각 참가자의 이동속도, 이동경로, 분기점에서의 경로선택, 도착지점 등의 정보를 취득하였고, 이를 Python ver.3.6.5에 데이터 분석처리 라이브러리인 Pandas ver.0.23을 결합시켜 개발한 프로그램으로 분석하였다.

다음 단계에서는 기존의 인명피난예측 툴을 이용해 대상공간에서의 피난특성을 예측하고 이를 상기 실측값과 비교분석함으로써 상호간의 수치적 차이를 제시하고 기존방식을 활용한 피난동선예측의 어려움을 설명하였다.

마지막 단계에서는 산업공학 분야에서 주로 사용되는 설계 툴을 이용해 도출한 시뮬레이션 결과값을 실측값과 비교분석함으로써 본 연구에서 제시하는 알고리즘의 타당성을 설명하였다. 본 연구에서 타 분야의 툴을 사용한 이유는 기존 인명피난예측 툴 중 분기점에서의 피난자 경로선택 특성을 반영한 명확한 의미에서의 피난경로예측 기능을 갖춘 툴이 없기 때문이다.

3. 승선자 피난훈련 모니터링 및 분석

3.1 피난훈련 개요[1)]

본 연구에서는 승선자의 이동특성을 모니터링하여 데이터베이스를 구축하고 또한 예측 툴에 대입할 적확한 형태로 가공하기 위하여 취득된 데이터를 통계기법으로 정형화하였다.

우선 2017년 9월 6일~7일 이틀 동안 한국해양대학교 실습선 한바다호에서 다음과 같은 내용으로 피난훈련을 수행하였다. 승선자 이동특성을 모니터링한 대상 구역은 실습선의 Upper deck 중 Fig. 2에 표시된 공간이며, 내부 구조는 Fig. 3, Fig. 4과 같다. 이 구조는 아래 SN1, SN2, SN3 3개의 시나리오를 구현하기 위해 고안된 것이다.

①SN1 : 피난경로에 연기가 없고, 익숙한 경로에서 피난하는 시나리오(피난공간 Fig. 3)

②SN2 : 피난경로에 연기는 없지만, 익숙한 경로가 폐쇄되어 다른 경로로 피난하는 시나리오(피난공간 Fig. 4)

③SN3 : 피난경로에 연기가 충진되어 EEBD(비상탈출용호흡구, Emergency Escape Breathing Device)를 착용한 상태에서 피난하는 시나리오(피난공간 Fig. 4). 이 시나리오에서는 빠른 연기 충진과 보충을 위해 2대의 연기발생기(Fog generator, FG) 사용

단순이동경로인 P01에서 P02까지는 24.5 m이고, 복합이동경로로 개발된 P02로부터 Exit(EB)까지 혹은 Exit(ES)까지의 최단경로거리는 각 경로중앙선기준으로 30.7 m로 동일하다. Fig. 3과 Fig. 4의 차이는 일부 벽의 위치를 변경하여 P02에서 Exit(EB) 혹은 Exit(ES)까지의 최단경로를 다르게 한 것이다.

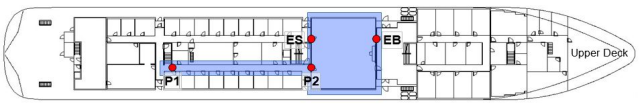

Fig. 2. Trial area at the Upper deck.

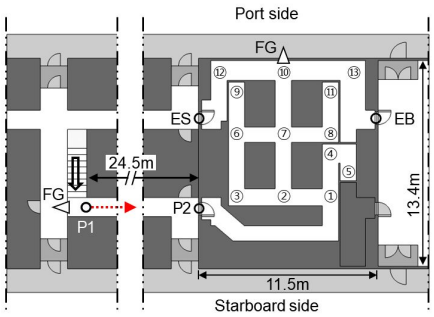

Fig. 3. Trial passages for SN1.

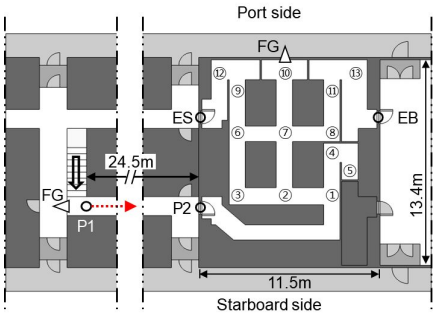

Fig. 4. Trial passages for SN2 and SN3.

피난훈련 참가자는 해상안전교육의 고급단계인 상급안전교육(64시간)을 사전에 이수한 해사대학 3학년 학생 60명이며, 이 들은 본 훈련에 임하기 전 Fig. 3의 도면을 제공받아 이동경로를 충분히 숙지하였다. 또한 참가자의 안전모에 액션캠을 부착하여, P1을 출발하여 동일한 거리에 있는 목표지점인 EB 혹은 ES에 도착하는 동안의 구간별 가시거리와 경로선택, 이동시간 등 피난활동정보를 개인별로 모니터링 및 녹화하였고, 훈련 종료 후 녹화된 영상물을 하나하나 목측 확인하며 기록하였다.

1) 피난훈련의 공간특성, 참가자특성, 측정장비와 측정방법 등은 Hwang et al.(2018), pp. 424-425에 구체적으로 기술되어 있으며, 본 절은 이를 본 논문에 적합한 내용으로 새롭게 작성한 것임.

3.2 피난경로 특성분석

3개의 시나리오를 수행하면서 중도에 피난을 포기한 7명(SN1, SN2에서 각 1명, SN3에서 5명)과 데이터가 무효한 인원(2명)을 제외하고 연인원 180명 중 95.0 %가 목적지에 도착하였다.

Table 1에 정리한 것과 같이 목표지점에 도착한 연인원 171명의 실습생 중 61.4 %(105명)는 Exit(EB)에, 38.6 %(66명)는 Exit(ES)에 각각 도착하였다. 도착지점의 일관성 관점에서는 Table 2에 나타난 것처럼 시나리오의 변화에도 불구하고 도착지점이 모두 동일한 인원은 총 51명 중 54.9 %에 불과하였다. 이는 54.9 %의 참가자만이 피난환경이 변하여도 숙지한 경로에 의지하여 이동한다는 의미이다. 또한, 연기충진 여부는 다르지만 공간구조가 동일한 SN2, SN3에서 도착지점이 동일한 참가자는 23.5 %로 나타났는데, 이는 SN2에서의 경로 학습효과가 SN3에 반영된 것으로 볼 수 있다.

Table 1. Arrival location on each scenario

		SN1	SN2	SN3
EB	No	42	33	30
	Ratio [%]	71.2	55.9	56.6
ES	No	17	26	23
	Ratio [%]	28.8	44.1	43.4
Sum	No	59	59	53
	Ratio [%]	100	100	100

Table 2. Arrival location consistency by each scenario

	Arrival location consistency	SN1 SN2 SN3	SN1 SN2	SN2 SN3	Diversity	Sum
EB	No	20	4	4		28
	Ratio [%]	39.2	7.8	7.8		63.6
ES	No	8	0	8		16
	Ratio [%]	15.7	0.0	15.7		36.4
Sum	No	28	4	12	7	51
	Ratio [%]	54.9	7.8	23.5	13.7	100.0

그러나 연구수행자의 경험에서 볼 때 가장 위험한 참가자는 매번 도착지점을 달리한 7명과 동일한 피난 구조임에도 불구하고 연기충진 여부에 따라 SN2와 SN3의 도착지점을 달리한 4명으로, 이들 11명(21.5 %)은 기존의 피난예측 도구로는 예측하기 어려운 대상에 속한다.

이에 본 연구에서는 취득된 데이터 중 시나리오별로 다음 기준에서 선정된 참가자의 이동특성 데이터만을 이후 피난 연구단계에서 활용하였다. SN1에서는 목적지에 도착한 총 59명에 대해 이동시간 상위, 하위 각 10 %를 제외한 47명 중 모든 이동경로의 정보취득이 가능한 42명을 분석대상으로 하였고, SN2의 경우에는 동일한 방법에 의해 선정된 34명을 분석대상으로 하였다. SN3의 경우에는 이동경로 대부분의 목측가시거리가 1 m 이내인 24명에 대해서만 분석하였다.

Table 3 ~ 5는 전술한 기준에 따라 시나리오별로 선정된 참가자들이 시나리오별 각 분기점에서 이동한 인접경로의 비율을 정리한 것이다.

Table 3. Route selection ratio from each point on SN1

From \ To	P2	1	2	3	4-5	6	7	8	9	10	11	12	13	EB	ES	Sum
P1	1.00															1.00
P2		1.00														1.00
1			0.74		0.26											1.00
2		0.02		0.11			0.87									1.00
3			0.17			0.83										1.00
5-4		1.00														1.00
6				0.11			0.67		0.22							1.00
7			0.03			0.03		0.17		0.76						1.00
8							0.50				0.50					1.00
9						1.00										1.00
10							0.04						0.27	0.69		1.00
11								1.00								1.00
12										0.13					0.87	1.00
13										0.08				0.92		1.00
EB														1.00		1.00
ES													1.00			1.00

Table 4. Route selection ratio from each point on SN2

From \ To	P2	1	2	3	4-5	6	7	8	10	12	(12)	13	(13)	EB	ES	Sum
P1	1.00															1.00
P2		1.00														1.00
1			0.84		0.16											1.00
2		0.05		0.11			0.84									1.00
3						1.00										1.00
5-4		1.00														1.00
6							0.07			0.93						1.00
7			0.03			0.14		0.37	0.46							1.00
8							0.17					0.83				1.00
10							0.68				0.15		0.17			1.00
12															1.00	1.00
(12)									1.00							1.00
13								0.14						0.86		1.00
(13)									1.00							1.00
EB												1.00				1.00

*(12), (13) mean directions from position 10 to right or left, respectively.

Table 5. Route selection ratio from each point on SN3

From \ To	P2	1	2	3	4-5	6	7	8	10	12	(12)	13	(13)	EB	ES	Sum
P1	1.00															1.00
P2		1.00														1.00
1			0.78		0.22											1.00
2		0.04		0.30			0.67									1.00
3			0.10			0.90										1.00
5-4		1.00														1.00
6				0.13			0.20			0.67						1.00
7			0.03			0.15		0.50	0.32							1.00
8							0.12					0.88				1.00
10							0.65				0.06		0.29			1.00
12						0.09									0.91	1.00
(12)									1.00							1.00
13														1.00		1.00
(13)									1.00							1.00
ES										1.00						1.00

*(12), (13) mean directions from position 10 to right or left, respectively.

3.3 피난속도 특성분석

Fig. 5는 피난시간별 빈도분포를 표시하며, 그림 상에 시나리오별 피난시간의 평균과 표준편차도 표기하였다. 이 그림은 SN1과 SN2는 차이가 거의 없지만 SN3에서는 0.3배 느려짐을 보여준다. SN2는 참가자가 숙지한 SN1 경로와 다른 경로를 제공하고 있지만 공간의 규모가 작기 때문에 SN1과의 사이에 의미있는 차이가 발생하지 않았다. 그러나 연기가 충진된 SN3의 경우에는 이동하고자 하는 전방에 대한 공간감각 저하로 인해 보행속도가 현저히 느려지는 것으로 분석된다.

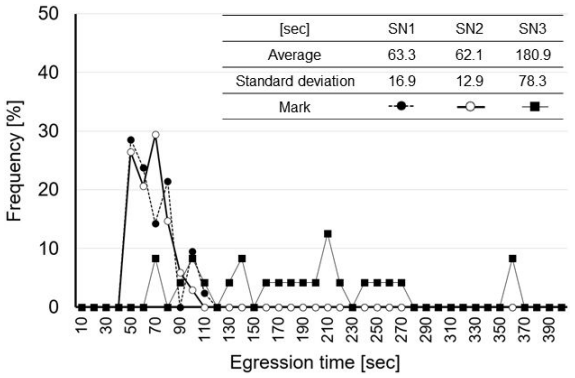

Fig. 5. Evacuation time frequencies of each scenario.

피난이동경로가 직선인 단순이동경로(P1 → P2)와 곡선과 분기점이 있는 복잡이동경로(P2 → Exit)가 구성되어 있기 때문에 이 연구에서는 다음 식(1)과 같이 정의된 상당피난속도(Equivalent evacuation velocity, v_e) 개념을 사용하였다.

$$v_e = \frac{l_s}{t_m} \tag{1}$$

단, l_s : 시나리오별 개인별 총이동경로, [m]
t_m : 시나리오별 개인별 이동시간, [sec]

시나리오별로 선정된 참가자들의 이동거리, 통과한 경로수, 그리고 식(1)에 의해 산출된 상당피난속도의 평균과 표준편차를 Table 6에 정리하였다. 또한 Fig. 6은 시나리오별 상당피난속도의 빈도수를 보여준다. 다양한 확률밀도함수 중 시나리오별 각 속도의 발생확률을 대표할 수 있는 것은 SN1의 경우 정규분포 확률밀도함수인데, 이는 이때의 카이검정 p-value가 0.528로 유의수준(0.05)보다 커서 실측값을 잘 표현한다고 할 수 있기 때문이다. 또한 SN2의 경우는 식(3)~(4)로 표현되는 삼각분포(p-value = 0.75) 확률밀도함수가, SN3의 경우에도 식(5)~(6)로 표현되는 삼각분포(p-value = 0.232) 확률밀도함수가 가장 근접한 표현방식이다. SN2, SN3의 삼각분포 확률밀도함수는 모두 x가 식(3)~(6)의 조건을 벗어날 때 $f(x) = 0$의 값을 갖는다.

Table 6. Monitored results on each scenario

		Moving distance	No. of passed points	Equivalent velocity
		[m]		[m/s]
SN1	Average	66	10	1.09
	Standard deviation	12	3	0.21
SN2	Average	71	11	1.17
	Standard deviation	17	5	0.26
SN3	Average	66	10	0.44
	Standard deviation	11	3	0.19

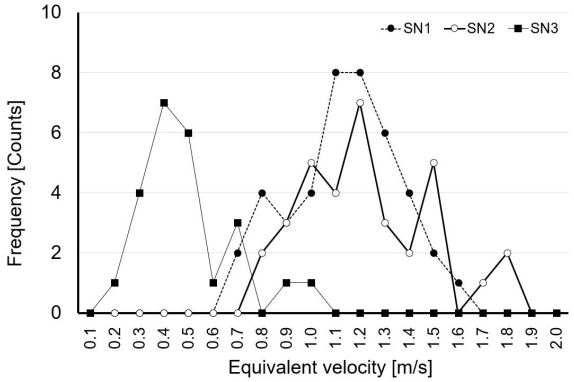

Fig. 6. Equivalent velocity frequencies of each scenario.

$$f(x) = \frac{1}{0.5214}\exp\left(-\frac{(x-1.09)^2}{0.0865}\right) \tag{2}$$

$$f(x) = 3.56(x-0.6) \text{ for 최소값}\leqq x \leqq \text{최빈값} \tag{3}$$

$$f(x) = 2(1.85-x) \text{ for 최빈값}\leqq x \leqq \text{최대값} \tag{4}$$

$$f(x) = 19.5(x-0.1) \text{ for 최소값}\leqq x \leqq \text{최빈값} \tag{5}$$

$$f(x) = 2.83(1-x) \text{ for 최빈값}\leqq x \leqq \text{최대값} \tag{6}$$

단, x : 상당피난속도, [m/s]

4. 피난동선 예측 및 분석

4.1 기존 피난시간예측 툴을 활용한 피난동선 예측

본 연구에서는 기존에 활용된 다양한 예측 툴 중 신뢰도가 매우 높은 Evi ver.3.7.4를 활용하여 인명피난예측을 수행하였다. Safety at Sea Ltd.(2013)에서 개발한 Evi는 IMO MSC.1/Circ.1533 Annex 3 pp. 1~16(IMO, 2016)에 제시된 피난시

간예측 시뮬레이션 방법과 조건을 만족하며, 특히 Evi 개발자들은 유럽기구(EU)가 해상인명안전을 위해 수행한 Framework Programme 7 프로젝트 SAFEGUARD에 참여함으로써 예측결과의 신뢰도를 향상시켰다(Nicholls et al., 2012). Fig. 7은 3장의 대상공간에 대한 Evi 모델링과 시뮬레이션 과정에서 에이전트의 이동모습을 보여준다.

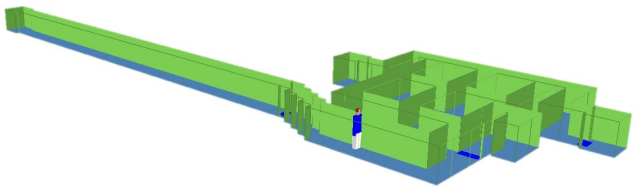

Fig. 7. Trial space modeling and simulation by Evi.

인명피난시뮬레이션은 50회 이상 수행해야한다는 IMO (2016, MSC.1/Circ.1533 Annex 3 pp.15)의 권고에 따라, 본 연구에서는 실측에서 얻은 Table 6, Fig. 6, 식(2)~(6)의 각 조건을 Evi에 입력하여 시나리오별로 60회씩 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 8는 Evi에 의한 시나리오별 피난시간 빈도분포를 보여준다. 이 결과를 Fig. 5와 비교하면 SN3의 평균 피난시간은 시뮬레이션 결과값이 실측값 대비 33초(18.2 %), SN2는 7.5초(12.1 %) 각각 짧은 것으로 예측하고 있지만, SN1의 경우에는 0.6초(0.9 %)의 차이만을 나타내었다. 피난경로를 충분히 숙지한 상황일 경우(SN1)에는 신뢰할 만한 예측결과가 도출되지만, 숙지한 것과 다른 경로(SN2) 혹은 연기 충진(SN3) 등 피난환경이 어려워질수록 시뮬레이션 결과와 실측값 사이에 차이가 커졌다. 이는 기존의 최단경로탐색법에 기초한 예측 툴은 피난자가 피난경로를 완벽하게 숙지하고 있다는 전제에서 개발되었기 때문에, 피난경로 상에 예상하지 않은 환경이 발생하여 피난이 방해를 받는 경우와 같은 상황에 대한 예측성능은 저하될 수밖에 없다는 문제를 현실적으로 설명하는 것이다.

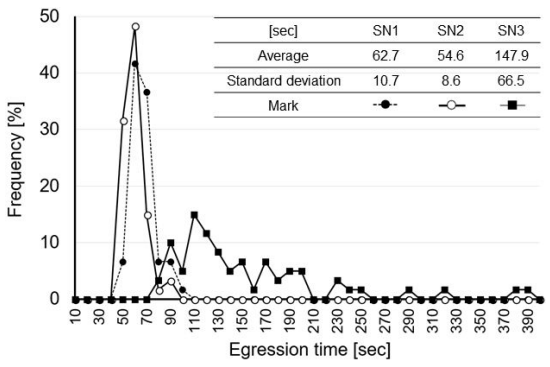

Fig. 8. Evacuation time frequencies of each scenario by Evi.

각 시나리오에 따른 도착지점별 인원과 비율, 이동경로를 Table 7에 정리하였다. EB지점으로의 도착비율이 48 %(SN1), 32 %(SN2), 33 %(SN3)로 이는 Table 1의 71.2 %(SN1), 55.9 %(SN2), 56.6 %(SN3)인 것과 큰 차이가 있다. 이는 최단경로탐색법은 항상 최단거리를 기준으로 경로를 선택하므로 통과했던 경로를 재방문하거나, 경로선택 갈등 등의 과정이 발생하지 않기 때문이며, 본 시뮬레이션의 경우에는 Table 7의 하단에 표시한 최단경로로 연결된 5가지 이동경로만 이용한 것으로 예측되었다.

Table 7. Arrived position ratio of each scenario by Evi

		SN1	SN2	SN3
EB(1)	No.	29		
	Ratio [%]	48		
ES(1)	No.	31		
	Ratio [%]	52		
EB(2)	No.		19	20
	Ratio [%]		32	33
ES-3	No.		14	11
	Ratio [%]		23	18
ES-7	No.		27	29
	Ratio [%]		45	48
Sum	No.	60	60	60
	Ratio [%]	100	100	100

* ES(1):P1-P2-1-2-7-10-12-ES, EB(1):P1-P2-1-2-7-10-13-EB
EB(2):P1-P2-1-2-7-8-11-13-EB, ES-3:P1-P2-1-2-3-6-9-12-ES
ES-7:P1-P2-1-2-7-6-9-12-ES

4.2 제안 개념을 반영한 피난동선 예측

전술한 바와 같이 기존 인명피난예측 툴 중에는 정확한 의미에서 피난경로를 예측하는 기능을 갖춘 툴이 없기 때문에 본 연구에서 제안하는 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 산업공학과 물류공학 분야에서 주로 활용되는 Arena ver 14.5를 사용하였다(Kelton et al., 2015). Rockwell Automation Inc.(2017)사가 개발한 Arena는 정해진 경로에서 객체의 흐름을 예측하는 용도로 활용되는 상용 툴로써, 툴의 특성 상 객체 간 충돌이 발생하고 상호간에 영향을 주고받는 다수 대중의 동시 다발적 피난해석에는 적용할 수 없지만, 충돌이 발생하지 않는 독립된 1인 피난예측에 활용한 사례는 찾을 수 있다.

4.1절에서와 같이 Table 6, Fig. 6, 식(2)~(6)의 조건과 Table 3~5의 각 분기점에서의 경로선택 비율을 Arena의 해당 모듈에 입력한 후 각 시나리오별로 60회씩 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 9는 본 연구에서 Arena로 설계한 모듈과 시뮬레이션 프로세스를 보여준다.

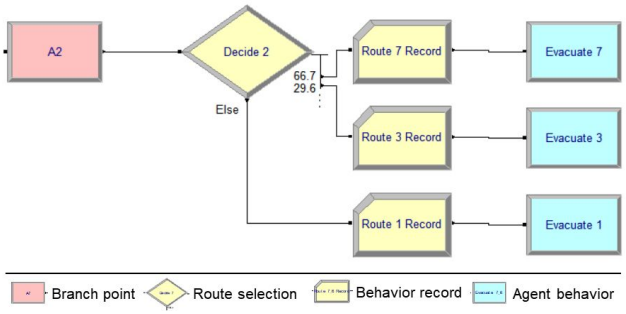

Fig. 9. A example of modules and simulation process by Arena.

Fig. 10은 Arena에 의한 시나리오별 피난시간 빈도분포를 보여준다. 이 결과를 Fig. 5와 비교하면 SN3의 평균 피난시간은 시뮬레이션 결과값이 실측값 대비 12.5초(6.9%) 짧은 것으로 예측하였지만, SN2는 0.4초(0.6%), SN1은 2.0초(3.1%)의 차이만을 나타내었다. 이를 기존 예측 툴에 의해 도출된 4.1절의 결과와 비교해보면 상대적으로 실측값과 매우 유사한 결과를 제시함을 알 수 있다. 이는 숙지한 상황일 경우(SN1)에서도, 숙지한 것과 다른 경로(SN2) 혹은 연기충진에 의해 피난이 어려워진 환경(SN3)에서도 각 경로선택 경험값을 포함한 인간행동 데이터를 활용함으로써 가능해진 것으로 분석된다.

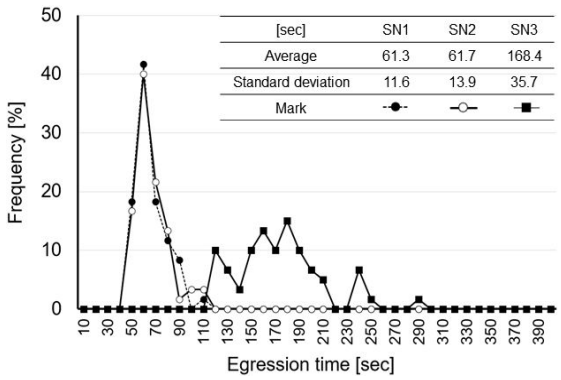

Fig. 10. Evacuation time frequencies of each scenario by Arena.

Table 8은 각 시나리오에 따른 도착지점별 인원과 비율, 이동경로를 정리한 것으로, EB지점으로의 도착비율 76.7 %(SN1), 61,7 %(SN2), 56.7 %(SN3)는 Table 1의 71.2 %(SN1), 55.9 %(SN2), 56.6 %(SN3)과 매우 유사한 결과이다.

또한 Fig. 9에 보이는 바와 같이 본 연구에서는 Arena를 설계할 때 각 에이전트의 모든 이동경로를 기록하였다. 그 중 Fig. 4의 경로 조건에서 막힌 경로에 해당하는 ⑤지점, ⑩지점에서 왼쪽으로 이동할 때 막힘이 발생하는 (12)지점, 오른쪽으로 이동할 때 막힘이 발생하는 (13)지점에 도달했다가 되돌아간 에이전트의 비율 중 SN3에 해당하는 것을 Table 9에 정리하였다. Table 9에서 알 수 있는 것과 같이 예측값과 실측값은 0.6~3.6 % 이내의 매우 유사함을 보였다.

Table 8. Arrived position ratio of each scenario by Arena [%]

	SN1	SN2	SN3
EB	76.7	61.7	56.7
ES	23.3	38.3	43.4
Sum	100.0	100.0	100.1

Table 9. Agent ratio of arrived-at closed position on SN3 [%]

Location	Trial	Arena	Compare
5	21.9	18.3	▽3.6
(12)	5.9	5.0	▽0.9
(13)	29.4	30.0	△0.6

*(12), (13) mean directions from position 10 to right or left, respectively.

5. 결 론

본 연구는 인명구조활동을 지원하기 위한 피난동선예측 알고리즘 개발의 첫 단계로써 피난동선예측 알고리즘의 개념을 정립하고 그 타당성을 수치적으로 명확히 제시하는 것을 목적으로 하였다. 제안하는 알고리즘은 평상시 선박의 모니터링 시스템으로부터 지속적으로 승객이동 데이터를 취득, 분석, 정형화하고, 재난발생시 이 데이터와 예측 툴을 활용해 도출한 승선자의 피난동선예측 정보를 구조자에게 제공하여 인명피해를 최소화시키는 프로세스로 요약할 수 있다. 연구성과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 60명이 참여한 3가지 시나리오의 피난훈련을 통하여, 숙지한 경로에서의 피난특성(SN1), 경로가 차단된 상황에서의 피난특성(SN2), 연기가 충진된 상태에서의 피난특성(SN3)을 모니터링하였다. 모니터링으로부터 취득된 내용은 이동속도, 이동거리, 선택경로, 도착지점 등이며, 통계기법에 의해 분석된 내용은 각 항목별 빈도분포와 관련 수식들이다.

둘째, 취득 데이터를 기존에 활용 중인 인명피난예측 툴에 입력하여 피난특성을 예측하였다. 피난경로를 충분히 숙지한 상황일 경우(SN1)에는 신뢰할 만한 예측결과가 도출되었지만 다른 시나리오의 피난시간과 도착지점 예측값은 실측값과 큰 차이가 있었다. 차이 발생의 근본적 원인은 최단경로탐색법에 기초한 기존의 예측 툴은 피난자가 피난경로를 완벽하게 숙지하고 있어 항상 최단거리를 기준으로 경로를 선택한다는 전제에서 개발되었기 때문이다.

셋째, 본 연구에서 제안하는 알고리즘의 타당성을 확인하기 위해 산업공학분야의 설계 툴을 사용하여 피난특성을 예

측하였다. 평균피난시간예측값과 피난동선(지점경유)예측값이 각각 0.6～6.9%, 0.6～3.6% 범위의 오차에서 실측값과 매우 유사한 경향을 보였다.

이상과 같은 결과로부터 본 연구가 제안하는 피난동선예측알고리즘의 구현이 기술적으로 가능하고 또한 수치적으로 타당함을 설명할 수 있다. 그러나 제안하는 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 본 연구에서는 세 번째 단계에서 피난안전분야가 아닌 산업공학분야에서 주로 활용되는 툴로써 독립된 1인의 피난동선예측만이 가능한 툴을 사용하였다. 그러나 이 툴은 피난자 간에 충돌이 발생하고 상호간에 영향을 주고받는 다수 대중의 동시 다발적 피난해석에는 적용할 수 없는 한계가 있기 때문에, 향후 본 연구에서 제안하는 알고리즘을 구현하기 위해 피난안전분야에 특화된 피난동선예측 툴을 개발할 계획이다.

References

[1] Hwang, K. I.(2011), Comparative Studies of Evacuation Time According to the Distribution Characteristics of Training Ship's Personnels (in Korean), Journal of Navigation and Port Research, Vol. 35, No. 3, pp. 213-218.

[2] Hwang, K. I.(2015), Simulation Analysis on Passengers' Normal Evacuation Scenarios Considering the Changes of Heeling Angle during MV Sewol's Sinking (in Korean), Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 21, No. 1, pp. 47-56.

[3] Hwang, K. I., I. S. Cho and Y. S. Lee(2016), A Study on Walking Characteristics of Novices at Onboard Environments under Blackout Conditions in a Training Ship (in Korean), Journal of the Korea Society of Marine Environment & Safety, Vol. 22, No. 1, pp. 74-81.

[4] Hwang, K. I., I. S. Cho, G. H. Yun and B. Kim(2018), A Comparison of the Trainees' Evacuation Characteristics according to the Indoor Smoke-fullfill during the Safety Training on Ship (in Korean), Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 24, No. 4, pp. 422-429.

[5] IMO(2016), Revised Guidelines on Evacuation Analysis For New And Existing Passenger Ships, MSC.1/Circ.1533.

[6] Kelton, W. D., R. P. Sadowski and N. B. Zupick(2015), Simulation with Arena, McGraw-hill, 6th ed.

[7] KMST(2018), Korea Maritime Safety Tribunal, Statistics for the marine accidents (in Korean), https://www.kmst.go.kr/kmst/statistics/annualReport/selectAnnualReportList.do (accessed May 11, 2018).

[8] Nicholls, I., Y. Hifi, B. S. Lee, E. R. Galea, S. Deere, D. Blackshields and G. Sharp(2012), The SAFEGUARD Heel Scenario Evacuation Benchmark And Recommendations To IMO To Update MSC CIRC 1238, SAFEGUARD Passenger Evacuation Seminar, Nov. 30, London, UK, The Royal Institution of Naval Architects.

[9] Rockwell Automation Inc.(2017), Arena ver 14.5, https://www.arenasimulation.com (accessed June 11, 2018).

[10] Safety at Sea Ltd.(2013), Evi - Guidance for validating/verifying Evi to IMO MSC Circ.1033 Annex 3.

Received : 2018. 06. 20.
Revised : 2018. 07. 30. (1st)
: 2018. 08. 03. (2nd)
Accepted : 2018. 08. 28.