

## FDS 모델링 기반 선내 대피경로 유도 알고리즘 실용설계

김 룰<sup>1</sup> · 주양익<sup>†</sup>

(Received August 7, 2018 ; Revised September 4, 2018 ; Accepted September 4, 2018)

### Practical design of FDS modeling-based emergency evacuation guidance algorithm in a ship

Ryul Kim<sup>1</sup> · Yang-Ick Joo<sup>†</sup>

**요약:** 선박의 대형화 및 복잡화가 이루어짐에 따라 비상 상황 발생 시 승객의 안전을 보장할 수 있는 비상대피 시스템의 필요성이 증가하고 있다. 하지만, 현재 선내 적용된 비상대피 시스템은 중앙통제그룹의 안내 또는 선내에 비치된 비상구, 피난안내도만으로 이루어져, 승객들의 본능적인 대피만을 유도해 2차 사고를 발생시킬 수 있다. 이를 해결하기 위해 다양한 센서 네트워크 기반 대피경로 탐색 시스템이 제안되었지만, 기존의 시스템들은 센서를 통한 위험인자 감지와 감지된 정보에 기반한 대피경로 탐색 시스템으로 구성되어 있어, 확실성이 있는 위험인자에 대한 고려가 부족하고 선박 내부의 구조에 대한 검토와 예측되는 위험에 대한 고려에 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문은 화재 시뮬레이터인 FDS (Fire Dynamics Simulator)를 사용하여 선박 내부 환경을 실제 선박환경에 기반하여 설계하고, 해당 환경의 내부 노드에서 위험인자 모델링을 통해 획득한 데이터를 경로 탐색 시스템에 적용하여, 보다 실질적 환경에서 실효성있는 대피경로 유도 알고리즘을 설계하고자 한다. 제안된 시스템의 성능은 선박 내 재난상황을 가정한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

**주제어:** 화재 시뮬레이터, 대피유도, 경로탐색

**Abstract:** In case of an accident on a large and complex cruise ship at sea, an emergency evacuation system is required to ensure the safety of passengers. However, using current evacuation methods, a crew just describes the physical location of the accident and guides evacuation using alarms and emergency guide lights. Accordingly, these methods are unsuitable for dynamically changing emergency situations and may cause additional accidents, owing to the lack of real-time status information. To solve such problems, several emergency guidance schemes have been proposed. However, these systems ignore some of the realities of ship accidents and are impractical because various risk factors are not considered. Therefore, this paper proposes an effective and practical emergency evacuation guidance algorithm by building a simulation model considering the actual ship environment based on the fire dynamic simulator and applying the risk information acquired from the sensor nodes in the simulator. The performance of the proposed method was verified through computer simulations based on structural and ship disaster situations.

**Keywords:** Fire dynamics simulator, Evacuation guiding, Path finding

## 1. 서 론

선박 사고의 특성상 사고지점과 구조자원 간의 거리가 멀어, 구조자의 접근 시간이 육상 사고 대비 지연된다는 문제점이 있다. 따라서 선내 사고상황 발생 시 육상 사고에 비해 초동대처가 매우 중요하다. 하지만 현재의 대형 선박 및 크루즈선 등에 적용된 비상대피 시스템은 중앙통제그룹이 재난 상황을 인식한 후, 대피 방송 또는 선원의 안내에만 의지하고 있고, 비상구만을 향한 비상안내유도등 또한 유동적인 사고상황에 대한 대응이 불가능하다. 이로 인해,

다수의 대피자들은 정확한 사고상황에 대한 인지가 불가능한 상태로 중앙통제그룹의 통제를 따르거나, 본능에 의존한 대피만이 가능하다. 이러한 시스템은 대피자에게 위험 요소의 실시간 변화에 대한 정확한 상황정보 전달을 어렵게 하여 유동적인 대처가 불가능하게 한다. 이에 따라, 센서 네트워크 기반 중앙집중적 의사결정을 통한 대피 유도 시스템이 제안되었다[1]. [1]에서 제안된 알고리즘은 다양한 위험 인자를 감지할 수 있는 센서가 여러 위치에 배치되어 탈출 시 어떤 경로가 위험인자에 대해 안전한지를 판

<sup>†</sup> Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3125-5316>): Associate Professor, Division of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: yijoo@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4419

<sup>1</sup> Ph.D. candidate, Division of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: kimruel@naver.com, Tel: 051-410-5080

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.

단하여 최적의 대피경로를 제안한다. 하지만, 해당 알고리즘은 위험인자의 유무에 대한 대피 경로 탐색 방식이며, 위험인자의 확산성에 대한 모델링에 있어 한계가 있다. [2]에서 제안된 시스템은 [1]에 비해 병목현상에 대한 모델링이 추가로 고려되었다. 이는 각 위치별 부하, 즉 대피자 수를 탈출 경로에 따라 트리 구조로 분산하여 부하분산 (Load-balancing)을 통해 전체 시스템의 부하에 따른 대피자의 탈출 시간의 최소화를 목표로 한다. 하지만 해당 시스템은 병목현상에 대한 모델링을 통해 탈출 시간을 개선함에 있어 의미가 있으나, 확산성을 가진 위험인자에 대한 반영에 있어 한계가 있다. 또한, 중앙집중적 센서 네트워크 기반 대피 경로 유도 시스템의 경우, 센서 및 통신기능들이 사고상황에도 정상적으로 유지되어야만 재난상황에서도 정상적으로 대피유도가 가능하여 지속가능성에 대한 보장이 어려울 수 있다. 이에 따라, 분산적(distributed) 의사결정 노드를 통한 경로 탐색 시스템이 제안되었다[3][4]. 해당 연구에서는 분산적 통신 방식을 통해 위험인자 정보를 교환하여, 안전하고 탈출가능한 경로를 제안하는 방식이다. 하지만, 위의 연구에서도 위험인자를 고려할 때, 확산가능한 위험인자에 대하여 실질적인 반영에 있어 한계가 있다.

따라서 본 논문에서는 재난상황 발생 시, 해당 노드에서 발생하는 위험요소에 대하여 확산가능한 위험인자(화재, 연기 등)에 대해 실제 사고상황에 실효성있는 대피 경로 시스템을 설계하기 위하여 화재시뮬레이터(FDS: Fire Dynamic simulator)의 하나인 Pyrosim 기반 지능형 대피유도 시스템을 제안하고자하며, 제안된 시스템의 성능은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

## 2. 관련 이론 및 연구

### 2.1 A\* 알고리즘 기반 지능형 대피유도 시스템[1]

경로 탐색 알고리즘은 크게 맹목적 탐색과 경험적 탐색으로 나뉜다. 맹목적 탐색은 정해진 순서에 따라 상태 공간을 점차 생성해가면서 해를 탐색하는 방법으로 모든 노드를 탐색하고 계산함에 따라 정확도가 높은 장점이 있다. 하지만, 연산시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 대표적인 알고리즘의 예로 Dijkstra 탐색과 Floyd 알고리즘이 있다. 경험적 탐색 방법은 상태 공간의 불특정함에 따라 문제 해결에 있어 계산 순서가 정해지지 않았을 경우 목표에 도달하는 데까지 가장 유망한 길을 평가 함수 등에 의해 선택하여 탐색을 진행하는 방법이다. 대표적인 알고리즘으로 A\* 알고리즘이 있다.

#### 2.1.1 A\* 알고리즘

주어진 출발점에서 목표점까지 가는 최단 경로를 찾는 그래프/트리 기반 탐색 알고리즘이다. 해당 알고리즘은 각 노드에서 목표점까지의 최상의 경로를 추정하는 ‘휴리스틱 추정 값’을 기반으로 순서대로 노드를 탐색한다. 이러한 특징은 경로 상 막다른 경로가 아닌 경우를 제외하고, 해당

추정 값을 기준으로 탐색하기 때문에 추정 값이 증가하는 방향으로 탐색을 진행하지 않는다. 이러한 추정 값을 파악하기 위하여 평가함수를 정의한다. 평가함수  $f(n)$ 의 수식은 식 (1)과 같이 주어진다.

$$f(n) = g(n) + h(n) \tag{1}$$

여기서  $g(n)$ 은 시작 노드로부터 현재 노드( $n$ )까지의 경로 비용을 나타내고,  $h(n)$ 은 현재 노드에서 목표 노드까지의 추정 경로 비용을 나타낸다.

#### 2.1.2 지능형 대피유도 시스템[1]

재난 상황 발생 시 구조물 구조에 익숙하거나, 피난 대피에 있어 위험요소가 존재하지 않을 때, 비교적 대피가 수월하다. 하지만 인원의 수가 많거나, 구조물의 구조가 복잡하고, 가까운 비상구가 화재 등의 위험인자로 가로 막혀있을 경우, 대피자는 최적의 경로를 찾아 탈출하기 매우 어렵다. 이러한 대피자의 탈출에 장애가 되는 요소를 체감 계수로 정의하여 가중치를 계산하고, 실제로 대피자가 체감하는 거리 값으로 반영한다. 이는 내리막과 같은 경우를 제외한다면 일반적으로 실제적인 거리보다 큰 값을 가지게 될 것이다. 본 연구진에서 [1]에서 제안된 가중치가 반영된 체감 거리는 식 (2)와 같다.

$$\overline{D_{w,r}} = \sum_m d_m \cdot \frac{\sum_{n=1}^N W_{n,m} \times O_{n,m} \times \overline{Ri}_{n,m}}{N} \tag{2}$$

$$,where N_m = \max(1, \sum_{n=1}^N O_{n,m})$$

여기서, 고려되는  $N$ 개의 위험요소들 중  $m$ 번째 부분 경로에서  $n$ 번째 위험요소를 고려하는 경우  $O_{n,m}$ 은 1로 설정되며 그렇지 않은 경우 0으로 설정된다.  $W$ 는 위험요소의 위험도 혹은 통과 난이도에 따른 가중치이며, 시간에 따른 위험인자의 확산을 고려하기 위한 위험예측계수  $Ri$ 를 함께 고려하여, 실제거리  $d$ 에 적용된다.

제안된 [1]의 최적 경로 유도 시스템은 발생한 위험인자에 대해 체감계수를 설계하고, 해당 값을 실제 거리 값에 반영하여 해당 노드에서의 휴리스틱 추정 값을 도출하고 평가함수에 반영한다. 이러한 연산을 통해 도출된 평가함수  $f(n)$ 의 값에 따라 탈출구까지의 최적 경로를 탐색한다.

#### 2.2 화재 시뮬레이터 (Pyrosim)

Pyrosim은 미국 국립 표준 기술 연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST)에서 개발한 시뮬레이터로써 FDS를 기반으로 Smokeview 프로그램을 포함하여 유저 인터페이스가 개선되어 편리하게 사용하기 위해 제작되었다. Navier-Stokes 방정식의 수치적인 연산된 결과를 연기와 온도 등의 확산으로 평가할 수 있다.

**Table 1:** Parameters of the Equation (3) ~ Equation (6)

$\rho$	density	$t$	time
$\nabla$	direction vector	$v$	velocity vector
$m_b'''$	volatility	$P$	pressure
$g$	gravitational acceleration	$f_b$	external force
$\tau_{ij}$	shearing stress	$h_s$	enthalpy for temperature change
$q'''$	heat release rate per unit volume	$q_b$	Particle heat release rate
$q''$	heat flow by conduction	$\epsilon$	rate of dissipation
$R$	gas constant	$W$	gas molecular weight

일반적으로 해당 시뮬레이터는 질량 보존의 법칙, 운동량 보존의 법칙, 에너지 보존의 법칙, 이상기체 법칙을 바탕으로 수행되고 해당 데이터셋을 제공하며, 연기, 온도 등의 확산 또한 Smokeview 프로그램을 통해 가시화되어 제공된다. 해당 시뮬레이터에 제공된 유체유동에 대한 지배 방정식은 식 (3) ~ 식 (6)과 같다[5]-[7].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho v = m_b''' \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial v}(\rho v) + \nabla \cdot \rho v v + \nabla P = \rho g + f_b + \nabla \cdot \tau_{ij} \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot \rho h_s v = \frac{DP}{Dt} + q''' - q_b''' - \nabla \cdot q'' + \epsilon \tag{5}$$

$$P = \frac{\rho R T}{W} \tag{6}$$

여기서 정의된 변수는 Table 1과 같다.

### 3. 시뮬레이션 모델링

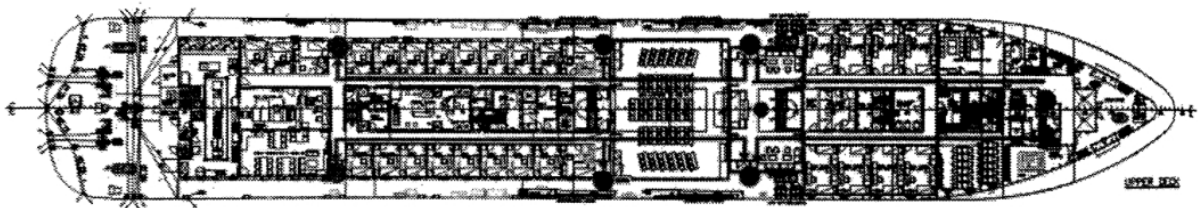
#### 3.1 한국해양대 실습선 기반 시뮬레이션 모델 구축

선내 재난 상황 발생에 따른 구조적 환경을 한국해양대학교 실습선인 한바다호를 기반으로 모델링을 수행하였다. Figure 1 (a)는 한바다호의 2층 도면이며, 도면을 기반으로 시뮬레이션을 진행하였다.

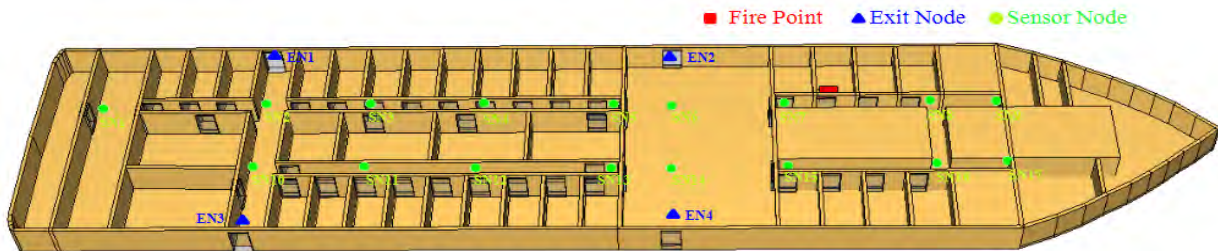
선박 구조적 특수성에 따라 육상의 구조물과 다소 차이를 가진다. 선내 천장의 높이는 약 2m이며, 복도의 폭은 약 1m이다. 이에 따라 선내 이동 간, 대피자들은 뛰거나, 빠르게 움직이는 것에 한계를 가지고 있고, 복도가 좁아 2명 이상의 사람이 동시에 통과하는 데 어려움이 있다. 추가적으로 선내 메인 출구를 출구 노드로 정의하였고, 시뮬레이션 환경에서 4군데 존재한다. 이 외에 교차로 구간과 복도의 끝, 중간에 일정한 간격 기준으로 위험인자 감지 센서가 위치한다. 해당 센서를 통해 위험인자의 확산에 따른 연기 농도, 화재의 정도를 파악하여 위급상황의 단계를 예측할 수 있다.

#### 3.2 제반 조건

시뮬레이션 대상은 한국해양대학교 실습선 한바다호 2층을 기반으로 단층설계 하였고, 면적은 약 1792m<sup>2</sup>이다. 해당 구조물의 크기는 가로 약 64m, 세로 약 14m로 내부 생활공간을 기반으로 설계하였으며, 이외의 용도의 공간을 고려하지 않아 실제 선박의 외피 구조 간 차이가 발생할 수 있다. 각 생활관의 면적은 약 7.6m<sup>2</sup>이고, 내부 창문은 존재하지 않는다. 발화원은 내부 생활관 중 임의의 한 곳을 발화점으로 설정하였다. 시뮬레이션 시간은 약 400초 동안 진행되었고, 공간을 분할한 셀 수는 196,608개, 셀 하나의 크기는 0.25m×0.25m×0.25m로 설정하였다. 또한 연기 밀도, 연기 감지하기 위한 장치들은 높이 2m 천장에 위치하도록 하였다.



(a) Training ship Hanbada



(b) Simulation modeling

**Figure 1:** Simulation environment

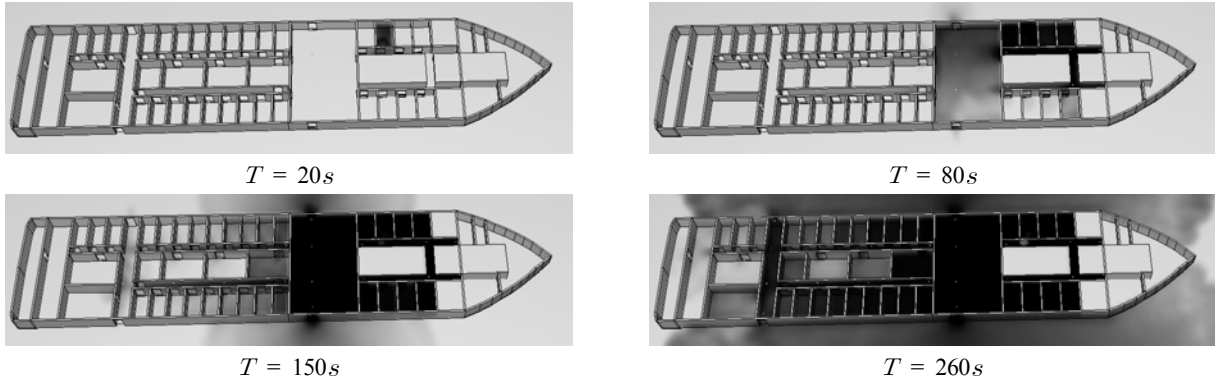


Figure 2: Smokeview simulation results

### 3.3 Smokeview 시뮬레이터

Figure 3은 제반 조건 하 Figure 1 (b)의 발화점을 기준으로 Smokeview 시뮬레이션을 수행하고, 시뮬레이션 시간을 기준으로 연기확산을 나타낸 시뮬레이션 결과이다. Figure 4를 확인하면  $T = 0$  s에 발화 지점에 화재가 발생하고  $T = 20$  s에 발화 지점의 인접 노드인 SN7에 가장 먼저 연기가 감지된다. 이후 연기가 확산되기 시작하면서 SN8에도 연기가 감지된다.  $T = 80$  s엔 구조물의 우측에 해당되는 모든 센서 및 출구 노드에서 연기가 감지되고 농도에 따른 확산 현상이 발생한다.  $T = 150$  s이 되었을 때는 우측 구조물은 연기 농도가 거의 포화되어있는 상태가 되어 해당 위치에서는 호흡이 불가능하여 연기에 의한 질식사고가 발생할 수 있다.

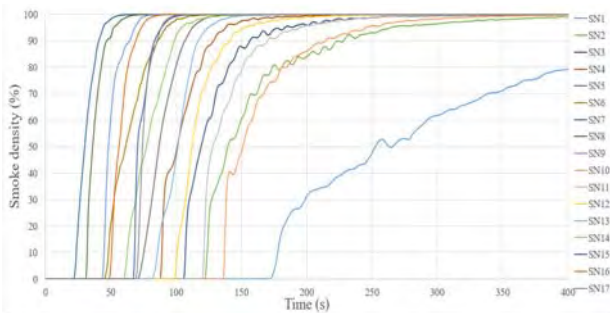


Figure 3: Smoke density

$T = 260$  s에는 해당 층에 전체적으로 연기가 감지되었다.

기존의 센서 네트워크 기반 대피 유도 시스템의 경우에는 해당 센서가 어떠한 위험인자를 감지하면 해당 위치로부터 안전하고, 신속한 대피가 가능한 출구로의 라우팅을 수행하였다. 하지만 실제 환경과 비슷한 구조물에서 확산 현상을 가진 연기에 대해 모델링한 결과, Figure 2의  $T = 80$  s일 때, 발화 지점 아래의 생활관의 경우 연기 감지(SN15)가 상대적으로 느리다. 이에 따라, SN15의 연기 감지가 SN17을 제외한 인근 센서들보다 느리기 때문에, 탈출 경로 탐색에 있어서 해당 노드는 알고리즘 측면에서의 오류가 발생할 수 있다.

### 4. 제안하는 시스템

Figure 4에 제안하는 방식을 도시하였다. 각 노드가 사고 상황에 대한 상태 정보를 공유하고 현재 상태가 위급상황일 경우, 해당 정보를 기반으로 대피 경로를 선정해 해당 노드가 위험인자에 대한 식별이 안 된 상태라도 빠른 대처가 가능하도록 설계하였다. 현재 상태가 위급상황이 아닐 경우에는 센서 노드가 정상상태인 경우의 역할을 수행하고, 센싱하는 데이터에 의해 시스템 상태가 변하면 해당 데이터를 인근 노드들과 공유하여, 위급상황에 대해 빠른 대처가 가능하도록 한다.

Table 2: The conditions of simulation

Classification	Contents	
Architectural scale	1 floor in a ship	
Floor plan	rooms and narrow corridors (see Figure 1)	
Plane size ( $m^2$ )	64 * 14 * 2 (Floorage 1792 $m^2$ )	
Cells	0.25 * 0.25 * 0.25 (Number of cells for mesh : 196,608)	
Set point	Reaction ID	NZ Reaction
	Reaction Species	C = 1.0, H = 2.20, O = 0.62, N = 0, Soot_yield = 0.07, CO_yield = 0.04
	Time	0 ~ 300 sec
Devices	Smoke Detector, Visibility, Soot Density	

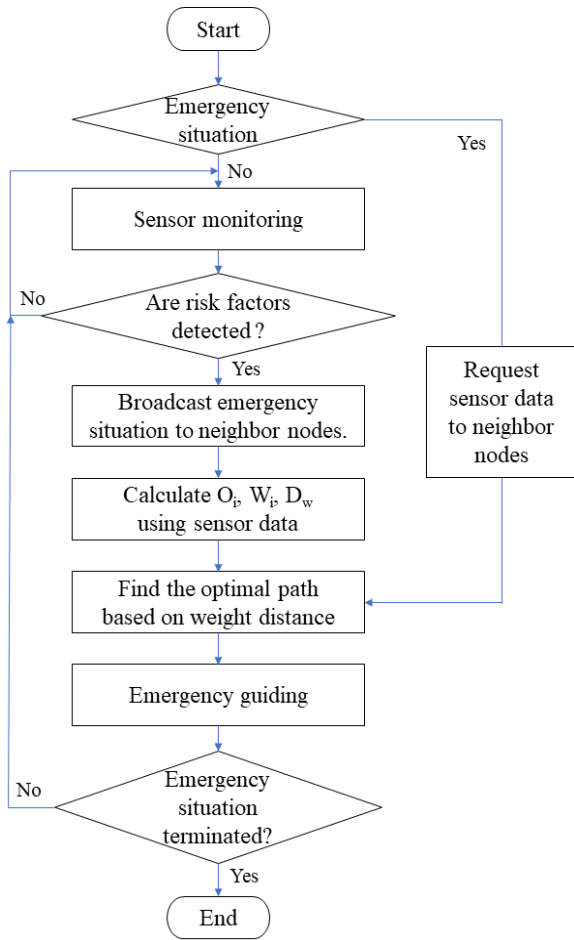


Figure 4: Proposed Scheme

### 5. 성능 평가

Figure 5는 화재 발생 시 발화지점 인근 센서의 반응 시간을 측정된 그래프이다. Figure 1 (b)를 참고하면, 발화지점 인근 감지 센서는 SN6, SN7, SN8, SN9, SN14, SN15, SN16, SN17가 배치되어있고 출구 센서 EN2와 EN4가 존재한다. 화재 발생 직후, 약 20 s이후 SN7이 화재의 발생을 감지한다. 또한, 인근 센서까지 확산이 진행하는데 약 20 s가 발생하고 가장 가까운 출구인 EN2는 약 50.89 s에 연기에 감지되고, 약 72 s엔 연기 농도가 70% 이상이 되어 탈출구로서의 역할이 불가능하며 다른 탈출구로의 이동이 요구된다. 또한, SN7과 반대편에 위치하는 SN15는 약 66.47 s에 연기가 감지되며, 약 76.82 s에 연기농도 70%까지 급속도로 상승한다. 따라서 센서의 반응 속도에 의해 탈출 개시 시간이 약 46 s까지 지연될 수 있다.

그리고, 연소하는 물질의 성분에 따라 연소독성이 다른데, 인체에 유해한 연소독성을 배출하는 우레탄의 경우 약 3~4분, 고무의 경우 7~8분 정도의 행동정지시간이 주어진다[8]. 따라서 약 46 s의 탈출 지연시간은 치명적일 수 있으며, 내부공간이 더욱 협소하고 복잡한 구조를 가진다면 더욱 위험할 수 있다.

Figure 6은 동일한 환경에서 센서 노드 별 예측되는 탈출

시간을 측정된 결과이다. 파란색 그래프(Normal)는 위험인자가 발생하지 않은 정상상황일 때 각 노드에서의 예상 탈출 시간을 나타내고, 노란색 그래프(Conv)는 위험인자 발생 시 체감거리 기반 기존 시스템[1]의 각 노드별 예상 탈출 시간을 나타낸다. 빨간색 그래프(Prop)는 본 논문에서 제안된 방식에 따른 평균 탈출 시간을 나타낸다. 실질적인 위험인자의 확산을 고려할 경우, 위험인자의 확산을 감지하는 시간의 지연에 의해 탈출 시간 지연될 수 있음을 확인할 수 있다.

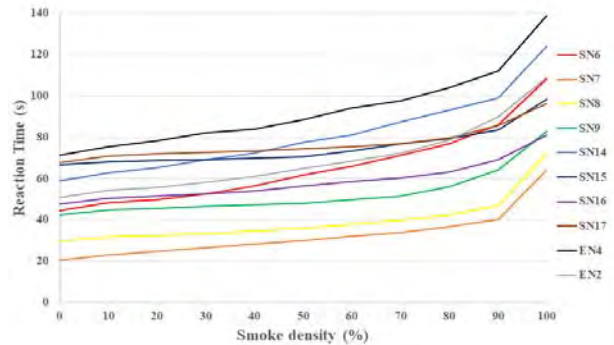


Figure 5: Smoke sensor reaction time

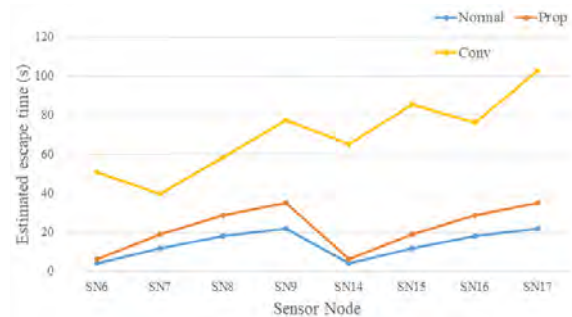


Figure 6: Estimated escape time

### 6. 결론

선내 재난상황 발생 시 구조자원이 투입되기까지의 초기 대응시간이 매우 중요함에 따라 지능적이고 실효성있는 비상대피시스템이 요구된다. 하지만, 현재 선내 적용된 비상대피시스템은 관계자의 안내지시 및 비상등을 제외하고 대피자에게 직관적인 위급상황을 전달할 방법이 존재하지 않으며, 이에 따라 다양한 센서 네트워크 기반 지능형 대피시스템이 제안되었으나 확산성을 가진 위험인자(화재, 연기 등)에 대한 모델링에 한계가 있어 실질적 위험상황에서의 신뢰성에 대해 보장할 수 없다. 따라서, 본 논문에서는 소방 및 건축 구조 설계에 직접적으로 이용되는 화재 시뮬레이터를 센서 네트워크 기반 대피 시스템에 적용하여, 확산성을 지닌 위험인자에 대하여 모델링하고 선내 환경과 유사하게 재현된 공간에 비치된 노드 간의 데이터 교환을 통해 신뢰성 있는 최적 경로를 제시하도록 하여, 선내 재난상황 시 실효성있는 대피경로 유도가 가능한 시스템임을 증명하였다.

## 후 기

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No.2016R1D1A3B03934492)

## References

- [1] M. B. Kang and Y. I. Joo, "Intelligent evacuation systems for accidents aboard a ship," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 40, no. 9 pp. 824-829, 2016 (in Korean).
- [2] L. W. Chen, J. H. Cheng, and Y. C. Tseng, "Distributed emergency guiding with evacuation time optimization based on wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 27, no. 2 pp. 419-427, 2016.
- [3] A. Filippoupolitis and E. Gelenbe, "A distributed decision support system for building evacuation," *Proceedings of Human System Interactions*, pp. 323-330, 2009.
- [4] H. G. Kim and Y. I. Joo, "Distributed optimal path guidance system considering communication isolation and transmission power for multistory ship evacuation," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 41, no. 7 pp. 677-682, 2017 (in Korean).
- [5] J. S. Yoon, *Fire Analysis for High-rise Apartment Building By Fire Simulation Program*, M.S. Thesis, Department of Production Engineering, Chungbuk National University, Korea, 2010 (in Korean).
- [6] Y. S. Sohn, S. K. Dan, B. W. Lee, S. P. Kwon, D. I. Shin, and T. O. Kim, "Simulation of heat and smoke behavior for wood and subway fires by fire dynamics simulator (FDS)," *Journal of the Korean Institute of Gas*, vol. 14, no. 6, pp. 31-37, 2010.
- [7] ThunderHead Eng, "PyroSim User Manual," The RJA Group Inc, USA 2011.
- [8] N. W. Cho, J. C. Lee, and D. H. Rie, "A comparative study on toxic gas index and stop time of mouse activity," *Journal of the Korean Institute of Fire Science & Engineering*, vol. 25, no 4 pp. 35-41, 2011 (in Korean).