

## 다층구조의 선박 재난 상황 시 통신적인 고립과 전송전력을 고려한 분산적 최적경로 탐색 시스템

김현곤<sup>1</sup> · 주양익<sup>†</sup>

(Received July 6, 2017 ; Revised July 19, 2017 ; Accepted August 4, 2017)

### Distributed optimal path guidance system considering communication isolation and transmission power for multistory ship evacuation

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

**요약:** 해상에서 대형화되고 복잡해진 유람선에서 사고발생시 대규모 인명피해로 이어지고 있다. 이러한 사고들을 바탕으로 기존의 승객의 안전을 확보하기 방안을 다시 검토해야한다. 지금까지 선박사고발생 시 탈출방법은 중앙 통제실에서 사고위치를 설명하고 그에 따른 행동을 경보신호나 비상유도등으로 선원과 함께 안내하는 것이 일반적이었다. 이러한 방법은 선박 내 화재나 침몰 사고 발생 시 실시간으로 변화하는 화재상황을 대비할 수 없어 기존의 연구는 화재상황을 동적으로 반영하여 최적의 경로를 탐색하기 위해 진행되어 왔다. 그러나 이 역시 정보를 전송하는 중앙 집중적 통신방식으로 이루어져 대피하는 무리에서 떨어져 통신의 관점에서 고립 될 경우 승객은 최적경로를 전송받지 못하여 인명피해로 이어질 수 있다. 비상용 대피장치의 지속성을 보완하기 위해 본 논문에서는 통신의 관점에서 고립이 되더라도 승객의 위치의 송신장치가 독자적으로 탈출경로를 계산하고 안내하는 분산적인 최적경로 탐색 시스템을 제안하고 위험 정도에 따른 안내 메시지 전송주기를 달리하여 불필요한 송신횟수를 줄여 전력의 효율성 또한 최적화 하였다. 구조물 및 선박 내 재난 상황을 가정한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안된 방식의 성능을 검증하였다.

**주제어:** 분산시스템, 안전, 최적경로, 전력효율성

**Abstract:** In case of an accident on a large and complex cruise ship at sea, large-scale casualties may occur. Therefore, it is necessary to rethink how the safety of the passengers can be ensured. In the current escape methods taught on a ship, the crew explains the actual physical location of the accident, and the evacuation paths are indicated using alarms or emergency guide lights. This method is not suitable for situations such as fire situations, which change in real time, or sinking accidents that may occur on a ship. Therefore, several studies have been conducted for identifying an optimal path that could reflect the real-time situation dynamically. However, as these were also centralized guidance methods, the passengers were unable to receive the optimal route information if they were isolated from the viewpoint of communication. In this paper, we propose a distributed optimal path search system that calculates and indicates the escape route independently, even if it is isolated from the viewpoint of communication. By varying the transmission rate according to the current disaster situation, the power efficiency can also be enhanced by reducing the number of unnecessary transmissions. The performance of the proposed method was verified through computer simulations based on structural and ship disaster situations.

**Keywords:** Distributed system, Safety, Optimal route, Power efficiency

## 1. 서론

최근 들어 선박재난사고가 꾸준히 발생하고 있으며 대표적인 예로 2014년 4월 16일 세월호 침몰사고가 있었고 그 이후에도 2015년 방글라데시 파드마 강에서 여객선 침몰로 50명이 사망하고 많은 인명이 실종하는 사고가 발생하였다.

이와 같이 선박사고 특성상 사고지점에서 구조자원 위치가 떨어져 사고지역 접근까지 많은 시간이 소요되어 승객의 대피가 육지보다 상당히 지연되는 경향이 있다. 이러한 선박사고 예방을 위해 국제해사기구(International Maritime Organization; IMO)에서 승객에 대한 탈출 규정인 Maritime

<sup>†</sup> Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3125-5316>): 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> Division of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail:hyungon88@kmou.ac.kr, 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.

Safety Committee / Circulation 1238 (IMO MSC/Circ. 1238)을 마련하여 규정에 만족할 것을 요구하고 있으며[1], IMO 규정을 만족하기 위한 많은 국내외 연구개발이 진행되어 다양한 기술들이 개발되어 왔다.

화재 발생 시 기존의 대피방법은 사고발생지점의 알람을 시작으로 AMS (Alarm Monitoring System) 시스템이 작동하여 엔진룸이나 조타실에서 전체 선실에 화재대피 방송을 하여 승객들이 비상유도등을 보고 개략적으로 위치를 파악하여 선박 밖으로 탈출해야 하는 구조이다. 특히 크루즈와 같은 선박에서는 복잡한 구조와 병목현상으로 인해 선원들의 대피유도를 통해서 사람들을 대피하도록 하는 것이 안전하고 효율적이지만 승객대비 선원들의 수가 충분하지 못하여 출구에 예상치 못한 화재가 발생한 경우 상황을 인지하지 못하고 선원들이 위험을 더욱 초래하는 경우가 발생할 수 있다. Y. I. Joo *et al.* [2]에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 실시간 화재상황을 반영하여 최적경로 탐색 알고리즘이 연구되었다. 그러나 이러한 탐색알고리즘도 중앙통제실에서 계산하여 송신하기 때문에 재난상황으로 인해 해당정보를 수신하지 못하는 지역이 발생한 경우 독립적인 탈출경로를 만들지 못하여 많은 인명사고를 초래할 수 있으므로 중앙 집중적 방식에서 벗어나 독립적으로 화재상황을 대비할 수 있도록 앞서 제안한 분산시스템[3]을 개선하고 구체화하여 실제 선박 내 재난상황에 대해 적용할 수 있도록 제안하였다.

## 2. 분산 탐색 시스템

기존의 탈출 시스템은 엔진룸이나 중앙통제실에서 승객이 존재하는 지점을 파악하고 탈출구까지 최단거리 및 주변상황을 실시간으로 파악하여 승객에게 탈출경로를 전송해주는 방식이었다. 이러한 방식에서 문제점은 화재가 발생하여 최단거리를 산출하여 전송하여도 통신의 관점에서 고립이 된 승객은 아무 정보도 받을 수 없게 되어 적절한 대피가 이루어질 수 없게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 각 노드에서 독립적으로 탈출경로를 계산하여 탈출하는 방안이 제안되었다[4]. 이는 선박 내부에 탈출 경로를 계산하고 관련 정보를 전송하는 Decision Node (DN)가 Sensor Node (SN)에서 실시간으로 전송한 화재정보와 릴레이 방식으로 공유된 경로정보를 바탕으로 출구까지의 최단경로를 분산적으로 획득하는 방식이다. 하지만 제안된 방식은 확실적인 전송주기, 범위를 기반으로 동작하여 재난상황에서의 전력효율적인 동작을 보장할 수 없으며 불필요한 중복 전송의 우려가 있다.

## 3. 제안하는 방식

### 3.1 조건에 따른 화재 상황 분류

NFPA 130(1997)[5]을 바탕으로 화재 상황을 Table 1과 같이 분류하였다. 규정에 근거하여 대피공간의 한계온도, 대

피한계 매연농도, 화재발생위치 장소를 고려하여 화재 상황별로 반영하였고, 이를 근거로 분산 탐색 알고리즘을 설계하였다.

Table 1: Definition of fire state

Fire state	Definition
Normal	Fire location : whole area Temperature : < 60°C Soot concentration : < 0.65mg/m <sup>3</sup>
State1	Fire location : residential area Temperature : > 60°C Soot concentration : > 0.65mg/m <sup>3</sup>
State2	Fire location : explosion hazard area Temperature: > 60°C Soot concentration : > 0.65mg/m <sup>3</sup>
State3	Coincidence of State1 and State2

### 3.2 화재 상황별 송신주기 분류

기존 논문의 연구결과 분산시스템을 이용한 DN은 전송주기가 5초 이상이 되어야 주변노드의 출구까지 최단거리 정보를 공유하여 승객에게 정확한 최적의 경로를 제공할 수 있었다. 본 논문에서 화재상황별 송신주기를 분류하여 기존 연구에서 제시한 전력효율[6]을 개선하였다. 화재상황을 4단계로 분류하고 노드끼리 최단거리 정보를 공유할 때 각 노드의 화재 상황을 공유하여 상황에 따른 정보 전송주기를 다르게 설계하였다. 첫 번째는 평상시 상태인 Normal 상태, 두 번째로는 폭발성이 없는 물질 주위 화재로 화재 진행 속도가 비교적 느린 화재를 고려하여 State1이라 정의하였다. State1의 상태를 공유하는 노드 전송 범위는 두 hop 이내로 제한하여 불필요한 정보의 중복과 재전송을 최소화 할 수 있도록 설계하였다. 세 번째로는 폭발성이 있는 물질이 주위에 존재하는 상태로 화재 진행 속도가 빠른 상황이라고 고려하여 State2라고 정의하였다. State2의 상태를 공유하는 전송범위는 폭발성 화재이므로 전체 노드가 상태를 공유하도록 유지하였다. 네 번째로는 State2 와 State3이 동시에 발생하는 상황을 가정하여 현재 위치 포함하여 전 지역이 위험에 빠질 수 있는 상태이므로 전송범위를 전 지역으로 하여 State4로 설정하였다. 본 논문에서는 각 상태별 위험정도에 따라 전송주기를 5초~30초까지 가변하도록 설정하였다.

### 3.3 노드의 동작순서

화재 상황별 상관관계가 정립이 된 상태에서 노드의 동작을 상세히 알아볼 필요가 있다. 노드의 동작은 Figure 1과 같이 표현될 수 있다. 앞 절에서 정의한 외부 상황과 자신의 노드상황을 구분한 뒤 앞 절에서 설명된 각 상태(state)를 열거형(enum type)으로 정의하여, Normal 상태를 '0'으로, State1을 '1', State2를 '2', State3을 '3'의 값으로 정의한 경우 각 DN의 동작을 Figure 1에 도시하였다.

State1의 경우 사고 지역 DN을 중심으로 2 hop 이내의 DN들만 사고지역 DN의 상황을 공유하여 화재정보를 수신한다. State2, State3는 자신의 주변 SN와 다른 지역 DN의 상황을 현재 DN이 수신하여 열거형으로 정의된 상태를 기준으로 상황별 값을 비교한 뒤 가장 높은 값이 현재 DN의 상태가 될 수 있도록 설계하고 화재가 진압되면 다시 정상시 상태로 돌아올 수 있도록 최상위 값을 Normal 상태로 돌아오는 신호로 정의하였다.

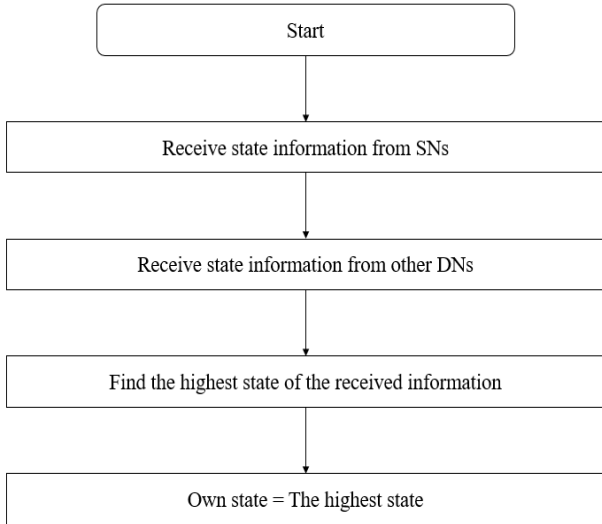


Figure 1: State decision of each node

### 3.4 Effective link

DN 이 가중치를 어떻게 반영하는지 알아볼 필요가 있다. 3.2절에서 설명한 화재상태를 반영한 가중치를  $S(i,j)$ 라 하고 노드 사이 실제거리를  $l(i,j)$ 라고 정하여 Effective link를 식 (1)과 같이 정의한다[4].

$$L(i,j) = S(i,j) \cdot l(i,j) \quad (1)$$

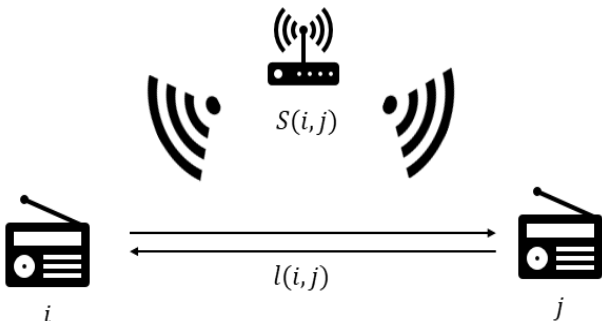


Figure 2: Relationship between DN and SN [4]

$S(i,j)$  값이 화재위치와 정도에 따라 상태가 정해지면 그 값을 실제 거리 값에 곱하는 것이 최종 Effective link로 나타난다. 이로 인해 출구까지 최단 경로를 산출할 때 경로

최소값을 고려하기 때문에 화재가 발생한 경로를 파악하고 우회가 가능하다. SN이 위험정도에 따른 가중치 값을 계산하여 주변에 있는 DN에게 전송하여 주변 DN은 자신의 화재상태에 따른 송신주기와 최단경로를 계산한다.

### 3.5 제안 알고리즘

기존의 분산적 방식의 최적 경로 탐색 알고리즘[4]은 다음과 같다. 다음은 우선적으로 알고리즘을 진행하기 위해 DN에 저장되어야 할 내용들이다.

- $u$ (현재 위치한 노드)를 포함한 출구까지 가는 모든 노드를 이어 Effective link(화재에 따른 가중치를 실제거리에 반영한 값)를 계산한 비용
- $u$  주변에 이웃한 노드  $n$ 에서 출구  $e$ 까지 노드끼리 이은 최단 경로 정보
- $u$ 에서 노드끼리 이어 출구까지 최단거리 비용
- 최단거리 비용 경로에 포함된 가장 가까이 이웃한 노드 정보

시작조건은  $u$ 가 출구에 있다고 가정하면 현재 위치가 곧 출구이기 때문에 출구까지 가는 거리는 '0'이 된다. 반면  $u$ 가 출구가 아닌 지역에 있다고 가정하면 실제 거리와 SN으로부터 파악된 가중치가 반영되어야 하므로 ' $\infty$ '로 초기 값을 설정하였다.

Table 2: Distributed optimal path search algorithm

0. Each DN $u$ collects status information from its neighbor SNs and determines $t_u$ 1. For each DN $u$ , send the neighboring node $n$ $L(u, e, x, t_u)$ containing the shortest path from $u$ to $e$ and $t_u$ 2. Each DN calculates cost $L(u, n)$ 3. DN receives neighbor nodes' $L(n, e, y, t_n)$ and calculates effective link $L(u, e, x, t_u) = L(u, n) + L(n, e, y, t_n)$ 4. Select the next neighbor node in the shortest path
--

위 내용을 바탕으로 Table 2와 같이 최적 경로 탐색 과정을 구성하였다.  $L(u, e, x, t_u)$ 는  $u$ 에서부터 출구  $e$ 까지의 경로  $x$ 에 대한 Effective link를 정의하며,  $u$ 의 화재상태 Normal, State1, State2, State3를 나타내는  $t_u$  포함하고 있다.  $L(u, n)$ 은 현재 위치  $u$ 에서 인접한 노드  $n$ 까지의 Effective link 값을 나타낸다.  $L(n, e, y, t_n)$ 는 이웃노드  $n$ 에서 출구 노드  $e$ 까지 Effective link 최단거리와 그에 따른 경로  $y$ ,  $n$ 의 상태  $t_n$ 을 나타낸다. 따라서  $L(n, e, y, t_n)$ 와  $L(u, n)$ 을 합친다면 현재위치 노드에서 출구로 가는 가중치를 반영한 최단거리 비용을 찾을 수 있다.

이러한 경로 분산 탐색 시스템 알고리즘을 각 DN에서 SN의 상태를 수신한 뒤 자신의 상태와 앞서 설명한 Effective link와 정보를 결합하여 상태를 공유하고 매 주기마다 갱신된 SN의 상태를 반영한  $t_u$  값과 Effective link 값을 반영하여 공유하도록 개선하였다.

### 3.6 다층구조의 고려

제안된 알고리즘은 Figure 3과 같은 다층구조인 선박구조에도 용이하게 적용할 수 있다. 기존의 연구[2] 방식을 다층구조에 도입한다면 각층마다 최단경로를 연산을 하여 공유해야하기 때문에 다층공간이 확장 될수록 다른 층의 출구까지 연산량과 시간이 늘어나게 된다. 하지만 분산 시스템은 각 층간 출입구를 중심으로 각 층을 연결하고 알고리즘을 확장하여 적용 가능하며, DN의 연산량은 공간이 확장되어도 각 DN은 정해진 노드만 계산하여 전파되므로 확장 전 연산량과 차이가 크지 않아 다층구조에서 최적의 경로를 빠른 시간에 대피자에게 송신할 수 있다.

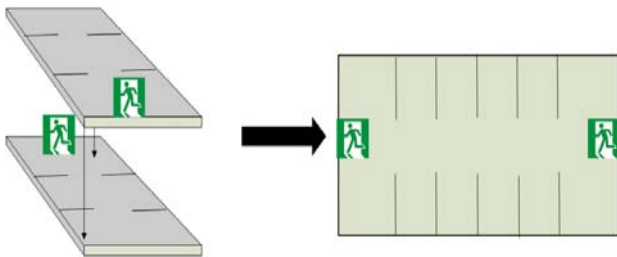


Figure 3: Multistory environment

## 4. 성능 평가

### 4.1 시뮬레이션 환경 및 조건

제안하는 분산 시스템의 성능을 평가하기 위해서 실제 선박구조와 유사한 객실과 복도가 있는 구조물을 가정하였다. 이를 Figure 4에 나타내었으며 제안하는 분산시스템 구현을 위해 노드를 임의 배치하고 각 노드에서 출구까지 최단거리의 노드를 선택하기 위해 A\* 알고리즘[7]을 적용하였다.

출구는 양쪽 두 곳으로 설정하였고 제안된 알고리즘 적용 시 가운데 지점을 기준으로 각 노드들은 자신에게서 가까운 출구를 우선순위로 두고 최적의 경로를 찾아가는다. 해당 출구 주변의 화재발생 시 반대편 출구로 최적의 경로를 찾도록 하고 제안된 알고리즘을 적용하지 않은 대피자는 화재 발생 시 자신과 먼 출구로 찾아가는 것 까지 고려하여 생존율을 산출하였다. 가상 구조물에서 나타날 수 있는 다양한 위험요소들은 공통적으로 화재상황, 연기로 인한 시야장애 등이 있으며 특수한 상황으로는 선박 내부 문제로 인한 기울어짐, 침수 등을 고려할 수 있다. 여러 위험요소의 영향에 대한 정확한 정보에 대한 연구와 이에 대한 적용은 본 연구의 범위를 벗어나므로 화재 위험요소에 대한 가중치만 가변적으로 적용하여 성능 평가를 진행하였다.

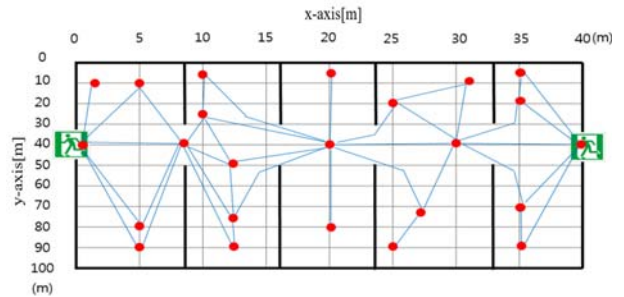


Figure 4: Virtual simulation environment

### 4.2 시뮬레이션 결과

처음으로 화재가 발생한 지역 수에 따라 송신횟수가 어떻게 변화하는지 살펴보기 위하여 Figure 4의 구조물 내부에 화재상황을 가정하여 전송횟수를 비교하여 그 결과를 Figure 5에 도시하였다.

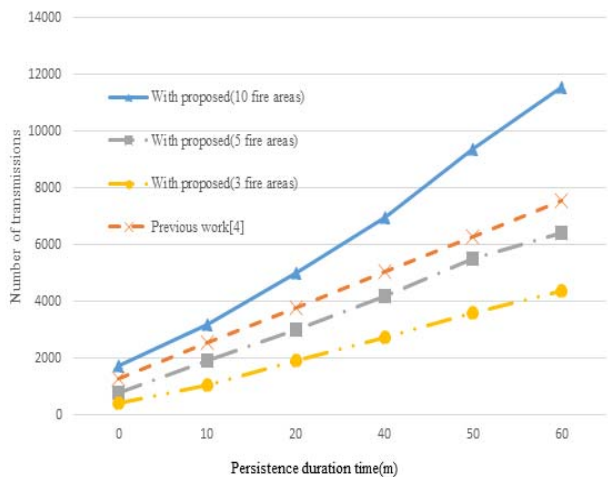


Figure 5: The number of transmissions

시험결과를 화재발생 지속시간을 매번 증가시켜 [4]에서 연구한 10초 주기의 고정주기 전송방식과 비교하였다. 세 지점의 화재상황에 대해 State 2로 가정하여 송신 횟수를 비교하였다. 화재발생지역이 5지점일 때는 State 4 상황인 노드가 2지점인 것으로 가정하고 나머지 3지점은 State 2로 가정하여 비교하였다. 화재발생 10개 지점인 상황은 State 4상황인 노드가 5지점, 나머지 5지점은 State 2상황으로 설정하여 상황에 따른 화재가 전송횟수에 얼마나 영향을 주는지 실험하였다. 송신전력과 대피자가 정보를 받아야하는 시간을 고려하여 정상시 주기를 30초로 설정하고 시뮬레이션을 수행하였다. 화재지역이 3지점인 경우, 화재지역 외에 나머지 노드의 정보 전송주기가 상대적으로 길기 때문에 전송전력을 34.6% 만큼 절약할 수 있었다. 화재가 5개 지점으로 확산된 경우에도 기존논문 실험 결과와 비교하여 28%의 전송전력 차이를 관찰할 수 있었다. 화재발생지역을 10개 지점으로 설정하였을 때는 전체 노드의 정보 전송주기가 5초로 단축되어 전송횟수가 급격히 늘어나 기존 논문 결과 대비 35% 이상 전송전력 소모가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

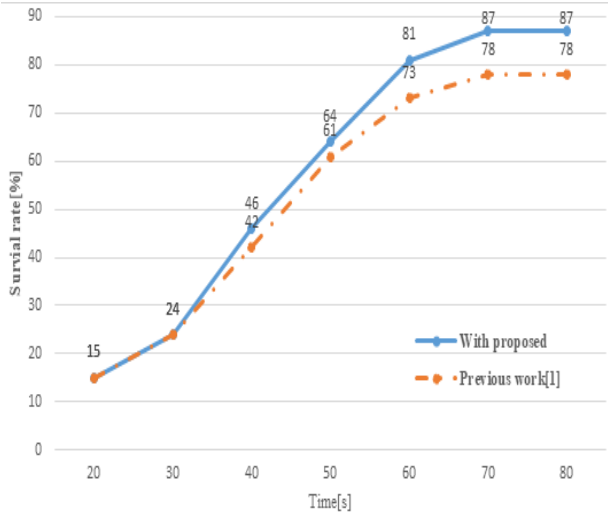


Figure 6: Survival rate with 20% isolated area

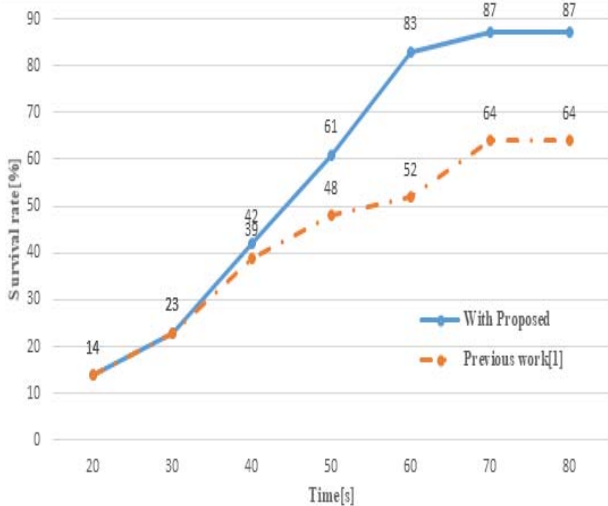


Figure 7: Survival rate with 40% isolated area

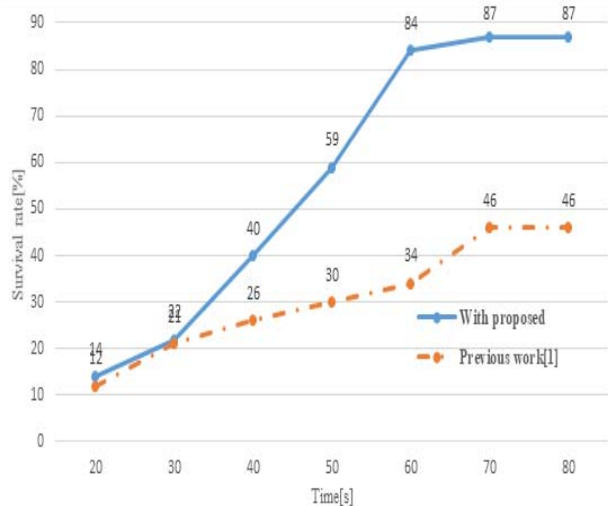


Figure 8: Survival rate with 60% isolated area

다음으로 확인해볼 사항은 통신의 관점에서 고립된 지역 범위에 따른 승객의 생존율을 비교해보았다. 실험을 위해 고립지역을 노드 수 기준으로 나누었다. 실험환경은 전체 노드의 20% 인 5개의 노드가 중앙부와 통신단절로 고립되었을 때를 가정하고 이후 차례로 각각 전체의 40%, 60%의 노드가 고립상황인 경우를 비교해보았다. 인간의 평균 보행속도 3m/s를 적용하였고 각 노드의 영역(coverage) 내에 3명의 승객이 있다고 가정하고 실험을 진행하였다. 각 그림에서 기준이 되는 실선 그래프는 논문에서 제시한 분산 시스템을 적용하여 실험한 결과이므로 각 노드에서 독립적으로 최적의 경로를 계산하므로 화재 상황에 따른 탈출경로의 변화로 탈출시간이 지연되는 현상을 제외하고는 실험환경을 조정하기 전 결과와 같은 생존율의 결과를 볼 수 있다. 하지만 이전 논문[2]에서 제안한 중앙 집중적 시스템은 통신의 관점에서 고립지역이 넓어질수록 승객이 실시간으로 변하는 화재상황을 반영하여 최적경로를 선택하지 못하고 가까운 출구가 아닌 현재 위치에서 거리가 먼 출구로 돌아가는 경우가 빈번히 발생하여 길을 찾지 못하고 생존율이 현저히 떨어지는 것을 관찰할 수 있었다. 만약 화재상황에 따른 보행속도의 감소 특성을 시뮬레이션에 반영한다면 화재에 따른 생존율은 더욱 떨어질 것으로 예상된다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 다양한 위험 요소가 존재하는 환경에서 재난 상황 시 안전하게 출구까지 대피하기 위한 방안을 고려하였다. 통신의 관점에서 고립이 된 상황을 대처하기 위한 최적 경로 분산 탐색 시스템을 제안하였으며 분산 알고리즘을 통해 각 노드에서 계산한 최적의 경로를 대피자에게 제시할 수 있었다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 제안된 방식을 통해 승객의 대피시간을 줄일 수 있었고 생존율 그래프를 확인한 결과 통신이 불능이 되더라도 승객은 안전하게 대피할 수 있음을 확인하였다. 아울러 본 논문에서 화재 상황을 선박으로만 제한하였지만 나아가 제시한 구조와 같은 복잡한 건물에 대해서도 적용할 수 있으며, 송신주기 조절을 통하여 재난 상황 시 노드의 전력효율성을 개선할 수 있다. 본 논문에서 제안된 방식이 적용될 경우 비상용 안전장치가 갖는 신뢰도와 기능이 향상됨으로써 인명피해를 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

### 후 기

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

## References

- [1] International Maritime Organization, Guide lines for evacuation analysis for new and existing passenger ship, IMO MSC/Circ1238, 2007.
- [2] 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).
- [3] H. G. Kim and Y. I. Joo, “A distributed guidance system for accident evacuation on board the ship,” Proceedings of the Korean Society of Marine Engineering Spring Conference, p. 241, 2017 (in Korean).
- [4] A. Filippopolitis and E. Gelenbe, “A distributed decision support system for building evacuation,” Proceedings of Human System Interactions, pp. 323-330, 2009.
- [5] W. O. Kim, J. S. Kim, S. G. Oh, and S. H. Kim, “A simulation study on distribution of smoke and temperature in accommodation on shipboard fires,” Proceedings of the Korean Society of Marine Engineering 2006 First Conference, pp. 293-294, 2006 (in Korean).
- [6] Y. D. Yoo, J. H. Choi, and N. Kim, “Power consumption analysis of SN according to beacon signal interval in IEEE 802.15.4 wireless star sensor network,” Journal of Korea Institute of Communications and Information Sciences, vol. 31, no. 9B, pp. 811-820, 2006. (in Korean)
- [7] V. Chakaravarthy, F. Checconi, P. Murali, F. Petrini, and Y. Sabharwal, “Scalable single source shortest path algorithms for massively parallel systems,” IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 28, no. 7, pp. 2031-2045, 2017.