



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

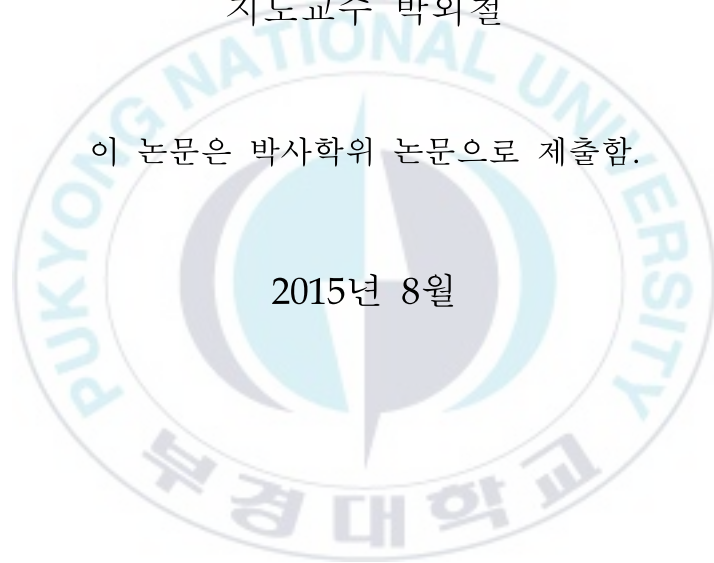
공 학 박사 학 위 논문

인명 생존율 향상을 위한  
선박 구조 개선에 관한 연구

지도교수 박외철

이 논문은 박사학위 논문으로 제출함.

2015년 8월



부 경 대 학 교 대 학 원

안 전 공 학 과

김 원 욱

김원욱의 공학박사 학위논문을 인준함.

2015년 8월 21일

위 원 장 공학박사 최 재 욱 (인)

위 원 공학박사 권 오 헌 (인)

위 원 공학박사 최 준 호 (인)

위 원 공학박사 이 치 영 (인)

위 원 공학박사 박 외 철 (인)

## [목 차]

List of Tables .....	iii
List of Figures .....	v
Abstract .....	vii
제 I 장 서론 .....	1
1. 연구 배경 .....	1
2. 연구 방법 .....	5
제 II 장 인명 안전 규정 .....	8
1. 국내·외 건축 관련 인명 안전 규정 .....	8
가. 한국 .....	8
나. 미국 .....	10
다. 일본 .....	13
2. 선박 인명 안전 규정 .....	14
가. 거주구역 높이 .....	14
나. 복도 및 피난구 폭 .....	15
다. 화재 관련 .....	16
라. 선원대피처 관련 .....	19
제 III 장 선원대피처 .....	20
1. 개요 .....	20
2. 해적 피해 상황 .....	21
가. 우리나라 선박의 대표적인 해적 피해 상황 .....	23
나. 전 세계의 해적 피해 상황 .....	23
3. 설비 현황 및 문제점 .....	26

가. 설비 현황 .....	26
나. 현행 선원대피처의 문제점 .....	28
4. 인명 안전을 고려한 규모 제시 .....	30
가. 바닥면적 .....	30
나. 피난구의 유효폭 산정 .....	32
다. 필요 피난시간 계산 .....	33
5. 화재 시뮬레이션 .....	35
가. FDS 개요 및 특성 .....	35
나. 시뮬레이션 분석 .....	39
6. 소결론 .....	49
<b>제 IV 장 선박 거주구역 구조 .....</b>	<b>50</b>
1. 거주구역 높이 .....	50
2. 복도 및 피난구 폭 .....	61
3. 제연경계벽 .....	71
4. 필요 피난시간 분석 .....	77
5. 소결론 .....	83
가. 거주구역 높이 .....	83
나. 복도 및 피난구 폭 .....	84
다. 제연경계벽 .....	84
<b>제 V 장 결론 .....</b>	<b>86</b>
<b>참고문헌 .....</b>	<b>88</b>

## List of Tables

Table 2-1 Life Safety standards (Korea) .....	9
Table 2-2 Life Safety standards (USA) .....	10
Table 2-3 New guidelines of disaster prevention construction design ..	13
Table 2-4 Summary of FSS Code .....	16
Table 3-1 Current state of nationality ship hijacking .....	21
Table 3-2 Hijacking situation of foreign-flag ship crews korean nationals on board .....	22
Table 3-3 Occurrence of pirates damage (2008~2014) .....	24
Table 3-4 Location and structure of the citadel .....	26
Table 3-5 Occupant load factor .....	31
Table 3-6 Occupant load factor .....	32
Table 3-7 Simulation parameters .....	40
Table 3-8 Time to reach a temperature of 60 °C (0.85m <sup>2</sup> /person) .....	43
Table 3-9 Time to reach the visibility of 5m (0.85m <sup>2</sup> /person) .....	45
Table 3-10 Time to reach a temperature of 60 °C (6.25m <sup>2</sup> /person) .....	46
Table 3-11 Time to reach the visibility of 5m (6.25m <sup>2</sup> /person) .....	47
Table 4-1 Simulation parameters .....	52
Table 4-2 Time to reach a temperature of 60 °C .....	53
Table 4-3 Time to reach the visibility of 5m .....	57
Table 4-4 Simulation parameters .....	61
Table 4-5 Simulation parameters .....	71
Table 4-6 Simulation parameters .....	72
Table 4-7 Time to reach a max. temperature .....	73

Table 4-8 Time to reach the min. visibility ..... 74  
Table 4-9 Evacuation scenarios ..... 77  
Table 4-10 Evacuation time for bottleneck scenario ..... 78  
Table 4-11 Evacuation time for bottleneck and obstacles scenario ..... 79  
Table 4-12 Evacuation time for moving stairs scenario ..... 80  
Table 4-13 Evacuation time for floor evacuation scenario ..... 81  
Table 4-14 Evacuation time for accommodation evacuation scenario ..... 82



## List of Figures

Fig. 2-1 Danger area by pirate (Korea) .....	19
Fig. 3-1 International Maritime Bureau piracy report .....	25
Fig. 3-2 Structure of the citadel .....	27
Fig. 3-3 Survival apparatus in citadel .....	27
Fig. 3-4 Survival apparatus in citadel (example) .....	28
Fig. 3-5 Flow of fire simulation .....	36
Fig. 3-6 Method of format conversion .....	37
Fig. 3-7 Example of FDS format .....	37
Fig. 3-8 Comparison of real fire and simulation with FDS for WTC ..	38
Fig. 3-9 Measuring point for temperature and visibility .....	41
Fig. 4-1 Drawing of HANBADA .....	51
Fig. 4-2 Measuring point .....	51
Fig. 4-3 Comparison of temperature variation with time at measuring point (10m from a fire source) .....	54
Fig. 4-4 Comparison of temperature variation with time at measuring point (20m from a fire source) .....	55
Fig. 4-5 Comparison of temperature variation with time at measuring point (30m from fire source) .....	56
Fig. 4-6 Comparison of visibility variation with time at measuring point (10m from fire source) .....	58
Fig. 4-7 Comparison of temperature variation with time at measuring point (20m from a fire source) .....	59
Fig. 4-8 Comparison of temperature variation with time at measuring point	

(30m from a fire source) .....	60
Fig. 4-9 Computational domain for FDS .....	62
Fig. 4-10 Variation of temperature with time for distance form fire source .....	63
Fig. 4-11 Variation of visibility with time for distance form fire source ...	64
Fig. 4-12 Computational domain for Pathfinder .....	65
Fig. 4-13 Result of evacuation simulation .....	66
Fig. 4-14 Comparison of fire simulation and evacuation simulation(Simulation time 6s). .....	68
Fig. 4-15 Comparison of fire simulation and evacuation simulation(Simulation time 12s). .....	68
Fig. 4-16 Evacuation persons according to corridor width .....	69
Fig. 4-17 Evacuation persons according to exit width .....	70
Fig. 4-18 Measuring point .....	72
Fig. 4-19 Temperature distribution without draft curtain .....	75
Fig. 4-20 Temperature distribution with 40cm long draft curtain .....	75
Fig. 4-21 Visibility distribution without 40cm long draft curtain .....	76
Fig. 4-22 Visibility distribution with 40cm long draft curtain .....	76
Fig. 4-23 Drawing of scenario 1 .....	78
Fig. 4-24 Drawing of scenario 2 .....	79
Fig. 4-25 Drawing of scenario 4 .....	81
Fig. 4-26 Drawing of scenario 5 .....	82

## A Study on Restructuring of Ship for Survival Rate Improvement

Won Ouk Kim

Department of Safety Engineering, The Graduate School  
Pukyong National University

### Abstract

In this paper the related regulations were reviewed and fire simulations and evacuation simulations were carried out in order to analyze the influence of ship structure improvement on life safety. Fire dynamics simulator for fire simulations and Pathfinder for evacuation simulations were used. First, this paper suggested the size from the standpoint of life safety in relation to the citadel which protects the life of crew when a ship is seized by pirates. Decrease in the Required Safe Escape Time(RSET) through increase in the height of the accommodation and width of corridor and evacuation exit of a ship was analyzed. In addition, the influence of draft curtain on reduction in Available Safe Escape Time(ASET) was analyzed. The results of this research are summarized as follows:

As there is no standard of the size and height of citadel in ship facilities standards, revision of the standards is required. The Korean Register of Shipping(KR) defines the floor space per capita as more than  $0.85m^2$  but there is no standard on it's height. As a result of analysis of the floor space and height of citadel by taking into account the evacuation threshold limit value, it was confirmed that the time for getting to ASET exceeded 17.1 seconds, which are the REST, in time of a fire less than 1MW when the floor space was more than  $6.25m^2$ /person and the height was more than 3m. In other words, ASET was met only after all crew were done with evacuation, through which this

paper confirmed that the floor space and height of citadel had a big influence on the life safety. As a result of measuring the temperature at the spot 10m distant from the origin of a fire in case the height of the accommodation was increased by 30cm from 2m to 2.3m, the time for getting to ASET value 40.8 seconds in case of 2.0m, and 96.6 second in case of 2.3m, showing improvement by 136.8%.

In case of visibility range, the time for getting to ASET from the spot 20m distant from the fire area was found to be 92.4 seconds in case of 2.0m, and 201.6 seconds in case of 2.3m, showing improvement by 118.2%. Such a result revealed that the ASET increase on a large scale in case the height of the ship accommodation was increased by 30cm.

As a result of the analysis of the influence of the width of a corridor and evacuation exit on survival of human life, it was found that there was a big influence on the decrease in the RSET when crowd density was more than 0.5 person/ $m^2$ , and width was increased by 50cm in case of a corridor. In addition, in case of an evacuation exit, it was confirmed that the RSET decreased when crowd density was more than 0.3 person/ $m^2$ , and width increased by 50cm.

Installation of a draft curtain, which wasn't installed at the existing ship was suggested. In case the length 30cm, temperature was 31.1°C, showing improvement by 6.6%. And in case the length 40cm, temperature was 27°C, showing improvement by 18.9%. As for visibility range reduction rate, it improved by 57% with 21.2m in case the length of a draft curtain was 20cm comparing to 13.5m in case of the absence of a draft curtain. In addition, in case a draft curtain was more than 30cm, it was found that there was no reduction in visibility range due to smoke. Accordingly, this paper could confirm that the draft curtain in length of more than 30cm was effective in the life safety.



# 제 I 장 서 론

## 1. 연구 배경

선박에 의한 해양사고에는 충돌, 접촉, 좌초 및 화재 등이 있다. 이러한 해양사고 발생 시 승객 및 선원들은 생명을 지키기 위해 피난해야 한다. 하지만 선박은 그 특성상 육상 건축물이나 타 운송수단에 비해 구조가 복잡하고 협소하다. 특히, 선박 동요가 발생하여 피난이 쉽지 않다. 또한, 해상에서 운항하는 특성 때문에 위험구역에서 피난을 완료해도 해상이라는 2차적 위험에 직면하게 된다. 이런 이유로 인명 안전의 관점에서 유효피난 시간 증가와 필요피난시간 감소를 위한 선박 구조 개선에 대한 연구가 필요하다.

우리나라는 전체 수·출입 물동량의 98% 이상을 해상운송에 의존하고 있다. 특히, 대표적 해적 활동 해역인 아덴만을 전체 우리나라 선박의 약 1/3이 이용하고 있다. 근래에 이 해역에서 우리나라 선박들에 대한 피랍 사태가 자주 발생하였다. 과거에는 상대적으로 피랍하기 쉬운 소형 상선 및 원양어선이 대상이었다. 그러나 현재는 삼호 드림호 및 한진 텐진호 피랍 사건에서 보는 바와 같이 초대형 유조선 및 20kts 이상 고속으로 운항하는 초대형 컨테이너선도 그 대상이 되고 있다. 즉, 해적은 위험해역을 운항하는 모든 선박들에게 위협요소가 되고 있다. 과거에는 소말리아 근해만 표적이 되었으나 근래에는 대형 모션을 이용하여 인도양 전체를 해적 활동 지역으로 확대하고 있다.

국제해사국(International Maritime Bureau) 통계<sup>1)</sup>에 따르면 소말리아 해적들의 선박 공격 건수는 2014년 245차례였으며 총 21척의 선박이 피랍되어 2013년 12척보다 75% 증가하였다. 그러므로 이 해역을 운항하는 선원들에게는 상당한 심적 부담감으로 작용하고 있다. 특히, 총기 및 휴대용 로켓포를 사용할 만큼 그 수법이 아주 흉포해지고 있어 인명 안전에 심각한 위협이 되고 있다.

이에 따라 우리나라에서는 해적에 의한 피해를 줄이기 위하여 제89차 국제해사기구(International Maritime Organization, 이하 IMO)의 해사안전위원회(Maritime Safety Committee)회의에서 국제 해운단체 및 국제기구 등에서 공동 발간한 소말리아 해적 피해방지 대응요령 이행에 대한 강제력 부족과 통합적 상황 관리 주체의 문제점을 지적하였다<sup>2)</sup>. 그 해결책으로 대응요령 이행 강화 방안을 제시하였다. 민간 무장승선요원 배치 등 다양한 대책을 수립하여 운영하고 있다. 그리고 우리 해군은 2009년 3월 청해부대를 창설하여 미국 제5함대가 주도하는 연합기동부대의 일원으로 아덴만의 해적 퇴치 활동에 참여하고 있다.

또한, 해적이 선박에 승선한 경우 선원들의 생명을 보호하기 위한 선원대피처의 필요성이 대두되었다. 이 해역을 통항하는 선원의 설문조사<sup>2)</sup>에 의하면 선원대피처 강제 설치 필요성을 67%로 높게 답변하였다. 이에 우리나라에서는 국제 항해 선박 및 항만시설의 보안에 관한 법률<sup>3)</sup>을 개정하여 선원대피처 설치를 강제화하였다. 강제 기준은 선박설비기준에서 정하는 고위험 해역을 항해하는 선박이 대상이다. 특히, 국제해사국의 2014년 해적 피해 데이터<sup>1)</sup>에 의하면 고위험 해역인 아덴만뿐만 아니라 서아프리카 해역 및 동남아 해역에서 해적이 급증 추세를 보이고 있다. 즉, 고위험

해역을 항해하는 선박뿐만 아니라 이 해역을 항해하는 선박도 선원대피처 강제 설치가 요구된다.

선원대피처 관련 기준은 선박설비기준에서 다루고 있으나 위치 및 크기에 대한 자세한 내용은 없다. 다만, 해적에게 위치 노출이 쉽지 않은 구역에 설치하도록 규정하고 있다. 해적의 진입을 막기 위한 잠금장치 개발에 대한 자료<sup>4)</sup>는 있으나 선원대피처의 규모에 대해서는 국내에서 연구된 바가 없다. 선원대피처를 한국선급협회(Korea Register)에서는 바닥면적을  $0.85m^2/인$ <sup>5)</sup>으로 설치하도록 되어있다. 하지만 이 바닥면적은 해적 진압작전 지연 등이 발생할 경우 선원들의 장시간 거주에는 협소하다. 특히, 화재의 특성상 내부 화재 및 외부에서의 연기 유입 시 생존 가능시간 증대에 중요한 요소인 선원대피처 높이에 대한 규정도 필요하다. 이러한 이유로 선원대피처의 바닥면적과 높이가 인명 안전에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다.

한편, 해양수산부 해양안전심판원의 통계자료<sup>6)</sup>에 따르면 우리나라에서는 '14년 총 1,779건의 해상사고가 발생하여 404명이 사망하고 63명이 실종되었다. 특히, '14년 4월 16일 진도 앞바다(맹골수도)에서 인천과 제주도를 왕복 운항하는 여객선인 세월호(길이 146m, 폭, 22m, 총톤수 6,852ton, 속도 21kts, 최대 승선인원 921명)가 침몰하여 2015년 5월 현재 총 476명 중 생존 172명, 사망 295명, 실종 9명의 인명피해가 발생하였다. 이를 계기로 인명 안전을 위해 선박 구조 개선이 유효피난시간 증가와 필요피난시간 감소에 미치는 영향에 대한 연구가 요구된다.

선박은 국제해상인명안전협약<sup>7)</sup>(International Convention for the Safety of Life at Sea, 이하 SOLAS)을 비롯한 각종 안전 관련 규정에 의해 건조되고 있으나 대부분 최소 규정만을 지키고 있다. 철도차량, 터널 그리고 건축분야에서는 화재에 의한 인명 안전 연구가 활발하게 진행되고 있으나 선박은 기존 구조에서 인명 안전성을 평가한 것이 대부분이다.

선형 연구로 해군함정 화재위험 개선을 위한 정량적 위험도 분석에 관한 연구<sup>8)</sup>와 선박의 화재안전도 평가에 관한 연구<sup>9)</sup>가 있지만 선박 구조 개선이 인명 안전에 미치는 영향을 연구한 것은 없는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 화재 시 인명 생존을 향상을 위한 선박 구조 개선에 관한 연구를 하고자 한다. 이를 위하여 인명 안전 평가의 기준이 되는 온도와 가시거리에 대한 연구를 수행한다. 이 연구 결과를 이용하여 선박 구조 개선 및 제연경계벽 설치가 유효피난시간 증가와 필요피난시간 감소에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 한다. 선박 구조 개선에는 거주구역의 높이, 복도 및 피난구 폭을 연구 대상으로 한다.

## 2. 연구 방법

해적에 의한 선박 피랍을 막기 위한 장소인 선원대피처는 특성상 밀폐된 공간에 대부분 설치된다. 그러므로 내부 자체 화재나 해적의 무기 공격에 의한 화재 및 연기 유입 등이 선원들의 인명 안전에 위협이 될 수 있다. 그리고 기존 선박 구조는 협소하고 복잡하여 화재 시 육상의 건축물과 비교해서 온도 상승 시간과 매연농도 증가 시간이 짧아져 유효피난시간이 감소할 수 있다. 이러한 이유로 이 연구에서는 육상 및 선박의 국내·외 인명 안전기준을 통하여 선원대피처의 규모와 거주구역 높이, 복도 폭 및 피난구 폭, 제연경계벽 설치 등을 제시하고 유효피난시간을 계산하였다.

이를 위한 연구방법으로 본 논문에서는 선박 화재 발생을 가정하여 생존 위협 요소인 온도 및 가시거리를 전산유체역학 모델인 Fire Dynamics Simulator(이하, FDS)<sup>10)</sup> Version 5를 이용하여 대피 허용 한계값에 도달하는 시간을 정량적으로 분석하였다. 화재시뮬레이션에 사용한 FDS는 3차원 공간에서의 복잡한 화재 및 연기 이동을 계산할 수 있다. FDS에 대한 자세한 설명은 제Ⅲ장에서 다룬다. 이 결과를 바탕으로 유효피난시간을 구하고 이 연구에서 제안되는 개선된 구조가 유효피난시간 증가와 필요피난시간 감소에 미치는 영향을 확인하였다. 여기서 유효피난시간 및 필요피난시간은 이론식<sup>11,12)</sup>이 포함된 피난 전용프로그램 Pathfinder<sup>13)</sup>를 사용하였다.

선원대피처 규모는 기존 기준과 국내·외 인명 안전기준을 검토한다. 이 검토 결과를 이용하여 바닥면적은 기존 기준인  $0.85m^2/인$ 과  $6.25m^2/인$ 을 설정하였다. 그리고 선원대피처의 높이는 선박의 다양한 구역에 설치되는 이유로 최소 선박 거주구역 높이 규정인 2m를 기준으로 1m씩 증가하여

최대 5m 까지를 조사대상으로 선정하였다.

그리고 선박 구조 개선에 관한 연구는 한국해양대학교 한바다호를 모델로 하여 화재시물레이션을 수행하였다. 복도 폭 및 피난구 폭은 선박의 일반적 폭인 1m를 기준으로 0.5m씩 증가시켜 최대 2.0m까지 범위를 설정하였다. 제연경계벽에 대한 연구는 실제 실습선 복도의 높이와 폭을 기준으로 하였다. 제연경계벽의 길이는 복도 높이를 고려하여 20cm, 30cm, 40cm로 설정하였으며 설치 간격은 10m로 하였다.

선박은 여러 가지 종류의 화물을 적재하고 운항하기 때문에 다양한 화재 발생 가능성이 높다. 그러므로 화원은 선박의 대표적 화재의 원인이 되는 목재와 유류를 선정하였다. 또한, 화재 크기의 다양성을 고려하여 10kW, 100kW, 1MW로 설정하여 화재시물레이션을 수행하였다. 온도 및 가시거리 측정 지점은 선원 및 승객들이 탈출하는 피난구로 하였으며 높이는 사람의 호흡선 위치인 1.8m로 설정하였다. 이 지점에서의 온도는 60°C를 초과하지 않아야 하며 허용 가시거리는 5m 이하<sup>14)</sup>라는 규정에 따라 온도는 60°C에 도달하는 시간, 가시거리는 5m 미만으로 낮아지는데 걸리는 시간을 계산하였다.

본 논문은 총 V장으로 구성하였다. 제 I 장에서는 연구의 배경과 방법을 기술하였다. 제 II 장에서는 국내·외 인명 안전 규정과 선박의 인명 안전 규정에 대해 검토하였다. 제 III 장에서는 해적에 의한 피랍 시 선원들의 생명을 지키는 선원대피처를 인명 안전의 관점에서 규모를 제시하였다. 제 IV 장에서는 화재 시물레이션 및 피난 계산을 통해 선박 거주구역 높이, 복도 및 피난구 폭의 개선 그리고 제연경계벽 설치가 유효피난시간 증가와 필요

피난시간 감소에 미치는 영향에 대해 정량적으로 분석하였다. 마지막으로 제 V 장에서는 본 논문의 결과를 정리하여 결론으로 하였다.



## 제 II 장 인명 안전 규정

선박 구조 개선이 인명 안전에 미치는 영향을 연구하기 위해 인명 안전 규정을 검토할 필요가 있다. 인명 안전 규정은 육상의 경우 건축법 및 소방법규에서 다루고 있으며 선박의 경우 SOLAS의 내용을 근간으로 제정되어 있다. 육상관련 인명 안전 규정으로 한국, 미국, 일본을 대상으로 하고 선박은 SOLAS의 인명 안전 규정을 검토하였다. 자세한 내용은 각 절에서 설명한다.

### 1. 국내 · 외 건축 관련 인명 안전 규정

#### 가. 한국

한국의 인명 안전 규정<sup>3)</sup>은 소방법규인 소방시설 설치유지 및 안전관리에 관한 법률시행령에 건축물의 피난설비에 대한 내용을 규정하고 있다. 그리고 피난기구의 설치유지 및 안전관리에 필요한 내용을 피난기구의 화재안전기준에 규정하고 있다. 그리고 건축법규에서는 건축법시행규칙과 동시행령, 건축물의 대피·방화구조 등의 기준을 규정하고 있다.

이 연구는 화재 시 선박 구조 개선이 유효피난시간 증가 및 필요피난시간 감소에 미치는 영향에 대한 것이다. 이 연구를 위하여 소방방재청고시 제2014-31호 소방시설 등의 성능위주설계 방법 및 기준의 별표 1<sup>14)</sup>의 내용

을 기준값으로 설정하였다. 즉, 대피허용 한계값은 온도 60℃, 가시거리 5m로 설정하였다. 자세한 내용은 Table 2-1과 같다.

**Table 2-1** Life safety standards (Korea)

구 분	성능기준	
열에 의한 영향	60℃이하	
가시거리에 의한 영향	용도	허용가시거리 한계
	기타시설	5m
	집회시설, 판매시설	10m

## 나. 미국

미국의 NFPA(National Fire Protection Association) 101<sup>15)</sup> 인명 안전 규정은 인명 안전을 위한 구조 등을 기술하고 있다. 이러한 인명 안전 규정은 사람의 안전에 중심을 두고 기술되어 있다. 또한, 소방 활동 시 거주자의 안전에 대한 대책도 요구하고 있다. 이 내용을 요약하면 Table 2-2와 같다.

Table 2-2 Life safety standards (USA)

구 분	내 용
1	적절한 용량으로 장애 없이 쉽게 접근하고 대피할 수 있는 충분한 수의 대피시설
2	대피시설의 사용기간 동안 화재와 연기로부터 대피시설의 보호
3	하나의 대피시설이 막힌 경우에 대비한 통로 및 또 다른 대피시설
4	탈출이 수단인 경우 거주자에게 대피처를 제공하기 위한 지역의 구획 및 내화구조
5	화재 발생 층에서 화재를 제한하기 위한 수직개구부의 방호
6	화재 시 소방서와 거주자에게 경보하는 경보설비
7	대피시설에 이르는 통로 및 대피시설에 적절한 조명
8	필요시에 대피시설에 이르는 통로를 유도하는 표지
9	화재로 밖에 있는 사람을 위협케 할 수 있는 위험지역 및 기구의 안전 배치
10	일사 분란한 대피를 보장하기 위한 대피 훈련 순서
11	패닉으로 수반되는 정신적 요인의 제한
12	거주자를 고립시키는 빠른 연소를 방지하기 위한 내장재 및 수납물의 제한

이 연구에 사용된 피난 예측방법은 미국소방학회(Society of Fire Protection Engineers, 이하 SFPE)에서 제시한 식으로 대피시간은 거주자가 거주구역을 빠져나간 시간을 말하며 식(2-1)<sup>11)</sup>과 같이 계산한다.

$$T_p = \frac{P}{F_c} \quad (2-1)$$

여기서,  $T_p$  : 대피시간

$P$  : 통과인원

$F_c$  : 유동계수

이다.

유동계수  $F_c$ 를 구하기 위해서는 세부 수식으로 구분하여 계산해야 하며 식(2-2) ~ (2-5)로 정리된다.

$$F_c = F_s W_e \quad (2-2)$$

$$F_s = SD \quad (2-3)$$

$$S = k - 0.266kD \quad (2-4)$$

$$D = \frac{\text{인원수(명)}}{\text{유효면적}(m^2)} \quad (2-5)$$

여기서,  $F_s$  : 비유동계수

$W_e$  : 유효 폭( $m$ )

$S$  : 대피속도

$k$  : 대피 속도 상수(복도 및 비상구 1.4 적용)

$D$  : 균중밀도

이다.



#### 다. 일본

일본의 대피 안전 평가 방법은 Table 2-3<sup>12)</sup>과 같이 계산되며 설계지침 방법 및 대피안전검증방법으로 구분하고 있다.

Table 2-3 New guidelines of disaster prevention construction design

설계지침방법	대피안전검증방법
거실허용 피난시간 $T_1 = 2 \sim 3 \sqrt{A_1}$	거실허용 피난 시간 $t_s = \frac{A_{room}(H_{room} - 1.8)}{\max (v_s - v), 0.01 }$
복도허용 피난시간 $T_2 = 4 \sqrt{A_2}$	복도허용 피난시간 $t_s = \frac{A_{room}(H_{room} - H_{lim})}{\max (v_s - v), 0.01 }$
층 허용 피난시간 $T_3 = 8 \sqrt{A_{1+2}}$	층 허용 피난시간 $t_s = \frac{A_{room}(H_{room} - H_{lim})}{\max (v_s - v_e), 0.01 }$

이 표에서,  $A_1$  : 층의 모든 거실의 합계면적( $m^2$ )

$A_2$  : 층의 모든 복도면적의 합계면적( $m^2$ )

$A_{1+2}$  : 당해실의 바닥면적( $m^2$ )

$H_{room}$  : 당해실의 기준점에서 평균 천장의 높이( $m$ )

$H_{lim}$  : 한계 연기층의 높이( $m$ )

$v_s$  : 연기발생량( $m^3/min$ )

$v_e$  : 유효 배연량( $m^3/min$ )

이다.

## 2. 선박 인명 안전 규정

선박의 인명 안전 규정은 SOLAS 협약<sup>7)</sup>을 주 내용으로 국내·외 규정이 제정되어 있다. 특히, 피난 관련 내용은 제Ⅱ-2에서 규정하고 있으며 별도의 소방안전코드(Fire Safety System Code, 이하 FSS Code) 제13장 탈출 수단 배치<sup>16)</sup>편에 상세하게 기술하고 있다.

### 가. 거주구역 높이

우리나라의 선박설비기준<sup>3)</sup>에서는 거주구역의 높이를 2.0m 이상으로 규정하고 있다. 일본의 거주구역 높이는 우리나라와 같다. 그러나 해사노동협약(Maritime Labour Convention)에 의해 전 세계적으로 동일하게 모든 거주구역의 높이를 203cm 이상으로 규정하고 있다. 단, 거주구역의 높이가 적절하다고 인정될 경우나 선원이 불편함을 느끼지 않는 경우에 높이를 완화할 수 있다.

이에 반해 공동주택(아파트)은 주택 건설기준 등에 관한 규칙 제3조<sup>3)</sup>에 의해 침실과 거실의 높이를 2.2m 이상으로 규정하고 있으며 상향되는 추세이다.

## 나. 복도 및 피난구 폭

### (1) 여객선

#### (가) 계단 폭

계단의 폭은 900mm 이상 되어야 한다. 계단을 이용하는 사람이 90명을 초과하는 경우 1명당 10mm씩 증가되어야 한다.

#### (나) 출입구 및 복도

탈출에 이용되는 출입구, 복도, 중간 층계참은 계단과 같은 방식으로 크기가 결정되어야 한다.

#### (다) 생존정 탑승을 위한 탈출로

여객과 선원이 생존정 탑승위치가 아닌 소집 장소에 모여 있을 때 소집 장소에서 탑승 위치까지 계단 및 출구 폭은 지휘를 받고 있는 인원 수를 기준으로 해야 한다. 단, 계단과 출구의 폭은 1,500mm를 초과할 필요는 없다.

### (2) 화물선

탈출에 이용되는 계단 및 복도의 폭은 700mm 이상이어야 하며, 그 한쪽에 핸드 레일이 부착되어야 한다. 통과 폭이 1,800mm 이상인 계단 및 복도는 그 양쪽에 핸드레일이 제공되어야 한다. 계단의 경사각도는 일반적으로 45도로 하지만 50도를 넘지 않아야 하며, 기관구역 및 소구획 내에서는 60도 이하로 하여야 한다. 계단으로 향하는 출입문은 계단의 크기와 같아야 한다.

## 다. 화재 관련

국내 소형 어선 및 연안선 외 모든 선박은 국제법을 따라야 한다. SOLAS 협약은 타이타닉호의 사고를 계기로 해양 사고 시 인명을 보호하기 위하여 1914년 영국 런던에서 체결된 최초의 국제 조약이다. 그 후 기술의 발전과 시대적 요청에 따라 채택된 조약이 SOLAS 1974이다. 이 조약은 1981년, 1983년과 1988년에 일부 개정되었다. 이 규정은 국제 항해를 하는 여객선 및 총톤수 500톤 이상의 화물선에 적용된다.

선박 화재와 관련한 SOLAS 협약의 내용은 협약에서 분리되어 별도의 FSS Code<sup>16)</sup>로 제정되었다. FSS Code는 총 16장으로 구성되어 있으며 피난 관련 규정은 제13장에 자세히 정리되어 있다. FSS Code 요약정리하면 Table 2-4와 같다.

Table 2-4 Summary of FSS code

Chapter No.	Content
CHAPTER 1	1 : 적용 2 : 용어의 정의 3 : 동등물과 현대 과학기술의 이용 4 : 독성 소화제의 사용
CHAPTER 2	1 : 적용 2 : 기술 사양
CHAPTER 3	1 : 적용 2.1 : 소방원 장구 2.2 : 비상탈출용 호흡구(EEBD)

CHAPTER 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 : 적용</li> <li>2 : 형식승인</li> <li>3.1 : 소화기</li> <li>3.2 : 휴대용 포말 방사기</li> </ul>
CHAPTER 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 : 적용</li> <li>2.1 : 일반사항</li> <li>2.2 : 탄산가스장치</li> <li>2.3 : 증기장치의 요건</li> <li>2.4 : 연료연소의 가스 생산물을 이용한 장치</li> <li>2.5 : 기관구역 및 화물 펌프를 위한 고정식 가스소화장치의 동등물</li> </ul>
CHAPTER 6	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 : 적용</li> <li>2.1 : 일반사항</li> <li>2.2 : 고정식 고펡창 포말 소화장치</li> <li>2.3 : 고정식 저팽창 포말 소화장치</li> </ul>
CHAPTER 7	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 : 적용</li> <li>2.1 : 고정식 가압수 분사 소화장치</li> <li>2.2 : 동등한 물분무 소화장치</li> </ul>
CHAPTER 8	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 : 적용</li> <li>2.1 : 일반사항</li> <li>2.2 : 동력공급 전원</li> <li>2.3 : 부속품 규정</li> <li>2.4 : 설치 요건</li> <li>2.5 : 장치 제어 요건</li> </ul>
CHAPTER 9	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 : 적용</li> <li>2.1 : 일반요건</li> <li>2.2 : 동력 공급원</li> <li>2.3 : 구성 요건</li> <li>2.4 : 설치요건</li> <li>2.5 : 장치 제어 요건</li> </ul>

CHAPTER 10	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 : 적용</li> <li>2.1 : 일반요건</li> <li>2.2 : 구성요건</li> <li>2.3 : 설치요건</li> <li>2.4 : 장치제어요건</li> </ul>
CHAPTER 11	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 : 적용</li> <li>2 : 기술적인 사항</li> </ul>
CHAPTER 12	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 : 적용</li> <li>2 : 기술적인 사항</li> </ul>
CHAPTER 13	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 : 적용</li> <li>2.1 : 계단의 폭</li> <li>2.3 : 출입구 및 복도</li> <li>2.4 : 탑승갑판으로의 탈출로</li> <li>2.5 : 탈출도면의 작성방법</li> <li>3 : 화물선</li> </ul>
CHAPTER 14	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 : 적용</li> <li>2.1 : 일반사항</li> <li>2.2 : 구성품 요건</li> <li>2.3 : 설치요건</li> </ul>
FSS Code 2002 / CHAPTER 15	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 : 적용</li> <li>2.1 : 일반사항</li> <li>2.2 : 구성부품의 요건</li> <li>2.3 : 설치요건</li> <li>2.4 : 운전 및 제어요건</li> </ul>
FSS 10 Amend / CHAPTER 16	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 : 적용</li> <li>2.1 : 일반사항</li> <li>2.2 : 구성요건</li> </ul>

## 라. 선원대피처 관련

선박설비기준<sup>3)</sup>에 선원대피처 구조 및 설비에 대해 규정하고 있으며 Fig. 2-1은 해적위험해역을 해도 상에 나타낸 것이다. 이 해역을 운항하는 선박은 선원대피처 설치가 의무화된다. 선박설비기준 제1항에 선원대피처는 강제 구조로서 해당 선박의 선원들이 대피하기에 충분한 공간을 확보하여야 한다고 규정되어 있다. 그러나 서론에서 밝힌 바와 같이 크기와 높이 등 규모에 대한 내용이 없으므로 선원대피처에 관련한 기준이 요구된다.



Fig. 2-1 Danger area by pirate (Korea).

## 제 III 장 선원대피처

### 1. 개요

선원대피처는 해적이 선박에 승선했을 경우 선원들이 대피하는 곳으로 선원들의 신속한 대피는 해군의 진압 작전에 아주 중요한 요소가 된다. 즉, 인질이 없는 경우 해군의 신속하고 확실한 진압 작전이 가능하므로 인질을 확보하지 못한 해적은 피랍을 포기할 것이다. 그 대표적인 예가 한진 텐진 호 사건이다.

제II장의 인명 안전 규정에서 언급한 바와 같이 선박설비기준에 의해 고위험해역을 운항하는 선박은 선원대피처를 설치해야한다. 하지만 선박설비 기준에는 고위험해역의 위치, 간략한 구조 및 설비에 대한 내용만 언급하고 있으며 크기와 높이 등 규모에 대한 내용은 없다.

선원대피처는 진압 작전이 장기화 될 경우 장시간 거주해야하는 특성을 가지고 있다. 특히, 내부의 자체 화재나 해적 공격에 따른 화재 및 연기유입 등이 선원들의 인명 안전에 위협이 될 수 있다.

이런 이유로 이 장에서는 화재 시 유효피난시간 증가 및 필요피난시간 감소의 관점에서 선원대피처 규모를 제시하고자 한다. 단, 이 해역을 항해하는 선박은 대부분 중대형 화물선이므로 이를 기준으로 하였다.

## 2. 해적 피해 상황

이 절에서는 국토해양부(현, 해양수산부)에서 12년에 발간한 해적피해 예방을 위한 해운업계 역량강화 및 국제협력 제고방안 연구<sup>2)</sup>의 내용을 인용하여 기술한다. 우리나라 국적을 가진 선박의 피랍현황은 Table 3-1, 우리나라 국민이 승선한 선박의 피랍 현황은 Table 3-2와 같다.

Table 3-1 Current state of nationality ship hijacking

선명	피랍일 (석방일)	장 소	피 해 내 역
628 동원호 (원양어선)	'06.4.4 ( '06.7.30)	소말리아 (조업 중)	소말리아 해역에서 피랍(한국인 8명, 중국인 17명 승선), 117일 만에 석방
브라이트 루비호 (산적화물선)	'08.9.10 ( '08.10.16)	소말리아 (항해 중)	아덴만에서 피랍(한국인 8명, 필리핀 선원 14명 승선), 37일 만에 석방

Table 3-2 Hijacking situation of foreign-flag ship crews korean nationals on board

번호	피랍일 (석방일)	선명/한국인	국적 /선종	피 해 내 역	소유 국가
1	'07.5.15 ( '07.11.4)	마부노 1·2호 (한국인 4명)	탄자니아 (어선)	소말리아 연안에서 피랍 173일 만에 석방	한국 (대창 수산)
2	'07.10.28 ( '07.12.12)	골든노리호 (한국인 2명)	파나마 (케미컬)	소말리아 연안에서 피랍 45일 만에 석방	일본
3	'08.11.15 ( '09.2.13)	퀵스타 비너스호 (한국인 6명)	파나마 (케미컬)	아덴만에서 피랍 88일 만에 석방	일본
4	'10.4.4 ( '10.11.6)	삼호 드림호 (한국인 5명 승선)	마셜군도 (유조선)	인도양에서 피랍 217일 만에 석방	한국 (삼호 해운)
5	'10.10.9 ( '11.2.9)	금미305호 (한국인 2명)	케냐 (어선)	소말리아 연안에서 피랍 123일 만에 석방	한국
6	'11.1.15 ( '11.1.21)	삼호 주얼리호 (한국인 8명)	몰타 (케미컬)	아라비아해 인근에서 피랍 6일 만에 구출	한국 (삼호 해운)
7	'11.4.30	제미니호 (한국인 4명)	싱가포르 (케미컬)	케냐 해상에서 피랍 586일 만에 구출	싱가폴

## 가. 우리나라 선박의 대표적인 해적 피해 상황

### (1) 삼호 주얼리호(11,566 G/T)

삼호 주얼리호는 화학제품운반선으로 아랍에미레이트를 출항해 스리랑카로 향해하던 중 해적에 의해 피랍되었다. 이 피랍 사건에서 주목할 점은 전용 선원대피처가 설치되지 않아 선미 로프 창고와 CO<sub>2</sub>실로 대피하였으나 무장 해적에 피랍되었다.

### (2) 한진 텐진호(74,962 G/T)

한진 텐진호는 컨테이너선으로 스페인에서 싱가포르로 향해하던 중 소말리아 동방 약 460마일 해상에서 해적의 공격에 의해 조타기가 고장났다. 이런 이유로 회피기동이 불가하여 해적들이 승선하게 되었다. 그러나 이 선박은 설치된 선원대피처에 모두 안전하게 대피하여 전원 구출된 대표적인 사례이다.

## 나. 전 세계 해적 피해 상황

2014년 전 세계의 해적공격 건수는 245건으로 전년(264건) 대비 7.2% 감소하였다. 소말리아 해적의 경우 11건이었으나 피랍건수는 없었다. 서아프리카의 경우는 41건(피랍건수 5건), 특히, 인도네시아는 100건으로 2013년에는 피랍건수가 없었으나 2014년에는 6척이나 피랍되었다. Table 3-3의 2014년 해적피해 데이터<sup>17)</sup>를 분석해 보면 소말리아 근해의 해적공격 건수는 발생하지 않았으나 서아프리카 해역 및 동남아 해역에서 증가하는 추세를 보이고 있다.

즉, 국제적 공조가 긴밀하게 유지되고 있는 소말리아 해적의 본거지인 아덴만과는 달리 서아프리카해역 및 동남아시아 지역에서는 줄지 않거나

오�히려 증가하고 있는 추세이다. 과거에는 선박의 물품을 절도하는 수준이 었으나 소말리아 해적과 같이 선원들을 인질로 하여 선박을 피랍하는 형태 로 진화하고 있는 것으로 분석된다.

**Table 3-3** Occurrence of pirates damage(2008~2014)

구 분		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
전 세계	해적공격 건수	293	410	445	439	297	264	245
	(선박피랍 건수)	(49)	(49)	(53)	(45)	(28)	(12)	(21)
소말리아	해적공격 건수	111	218	219	237	75	15	11
	(선박피랍 건수)	(42)	(47)	(49)	(28)	(14)	(2)	(0)
서아프리카	해적공격 건수	55	47	39	52	62	51	41
	(선박피랍 건수)	(3)	(1)	(0)	(2)	(9)	(7)	(5)
인도네시아	해적·무장강도 공격건수	28	15	40	46	81	106	100

Fig. 3-1은 국제해사국에서 정리한 2014년 해적 발생도이다. 총 245건의 해적 피해가 발생하였고 주로 아프리카 및 동남아시아 해역에서 발생하였다.



Fig. 3-1 International Maritime Bureau piracy report<sup>1)</sup>.

### 3. 설비 현황 및 문제점

#### 가. 설비 현황

Table 3-4는 현재 선박에 설치된 선원대피처의 위치 및 구성에 대한 내용이다. 선원대피처는 해적이 찾기 힘든 장소에 설치하도록 권고하고 있다. Table 3-4에서 보는 바와 같이 선원들이 거주하는 일반적인 장소가 아닌 특수한 곳에 설치하고 있다. Fig. 3-2<sup>4)</sup>는 방화문, 출입구 잠금장치 및 환기시스템의 예를 보여준다. Fig. 3-3와 3-4<sup>4)</sup>는 비상상황을 고려하여 선원대피처 내부에 비치된 장비와 식량이다.

**Table 3-4** Location and structure of the citadel

위 치	구 성
기관실 작업실 상부	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 기관실 작업실 상부 빈 공간 이용</li> <li>2. 거주구역, 타기실 및 기관실을 통해 접근</li> <li>3. 멘홀 입구를 통해 진입</li> </ol>
주거구역	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 기관실 연돌 진입로 이용</li> <li>2. 출입구 보안장치 설비</li> <li>3. 출입구 내부 해적방지 장치 설치</li> </ol>
빈 공간구역	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 2nd 데크 빈 공간을 이용</li> <li>2. 화물, 연료유, 평형수 탱크 이용</li> <li>3. 출입구를 멘홀로 설치</li> </ol>
타기실	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 기존 공간 활용</li> <li>2. 외부 출입 가능한 개구부에 보안장치 설치</li> <li>3. 외부 출입구에 해적 방지문 설치</li> </ol>

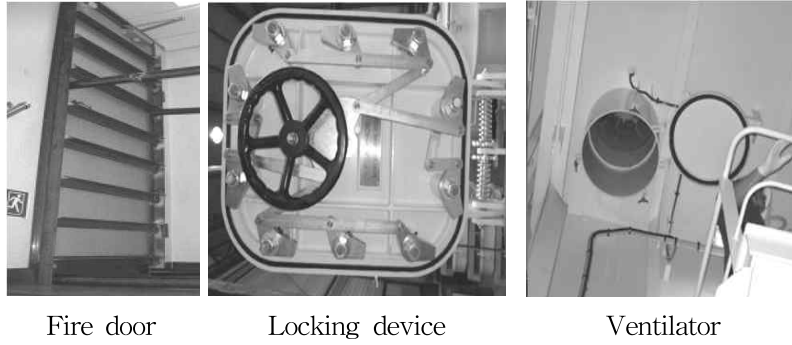


Fig. 3-2 Structure of the citadel.



Fig. 3-3 Survival apparatus in citadel.



Fig. 3-4 Survival apparatus in citadel (example).

#### 나. 현행 선원대피처의 문제점

소형 선박 또는 어선의 경우 협소한 공간으로 선원대피처를 설치할 공간이 없을 수 있으며 설치를 한다고 하더라도 기존 공간을 활용하게 되어 식별이 쉬울 수 있다. 특히, 협소한 장소로 인하여 선원들이 장기간 거주할 수 있는 충분한 공간을 확보할 수 없어 대피 후 신체적 위해가 발생할 수 있다.

선원대피처의 설치 장소가 거주구역과 멀리 떨어진 경우에는 피난 시간이 증가하여 선원이 인질이 될 가능성이 높아진다. 이런 경우 해군의 작전에 제한이 생겨 선원대피처는 그 역할을 하지 못할 수 있다.

선박설비기준에는 선원대피처의 규모에 대한 규정이 없다. 단, 한국선급협회의 기준<sup>5)</sup>에 의하면 선원대피처는  $0.85m^2$ /인 이상 설치되도록 규정하고 있다. 그러나 이 기준은 내부의 자체 화재나 해적의 공격에 의한 화재 그리고 연기 유입 등을 감안하면 협소한 것으로 판단된다. 따라서 인명 안전의 관점에서 선원대피처의 규모에 대한 기준 제시가 요구된다.



## 4. 인명 안전을 고려한 규모 제시

현재 선원대피처의 규모는 1인당 바닥면적  $0.85m^2$  이상 설치하도록 규정하고 있다. 이 연구에서는 인명 안전의 관점에서 장시간 거주가 필요한 선원대피처의 규모를 제시한다. 이 연구를 위하여 기존 선원대피처 규모에 대한 규정과 육상 건축물의 규정을 참조한다.

### 가. 바닥면적

선박설비기준에 의하면 선원대피처는 장시간 생활이 가능하도록 식량을 구비하도록 되어있다. 즉, 최소한의 거주생활이 가능하여야 한다는 의미이다. 미국 인명 안전기준<sup>18)</sup>에 따르면 Table 3-5과 같이 적정 수용인원을 정하기 위한 계수를 정하고 있다.

선박에 따라 약간의 차이가 있지만 근래의 자동화 선박은 일반적으로 약 20명 정도의 선원이 승선한다. 선원대피처는 해적 피랍에 대처하기 위하여 선원이 대피하는 곳으로 일반적인 선박의 거주공간이나 육상의 거주구역과 동일하게 면적을 산정하기는 어려울 것이다.

그러나 너무 협소하게 만들어지면 피난 과정에서 발생된 환자, 고령자, 평소 건강 상태가 좋지 않은 선원은 건강에 위협이 될 수 있을 것이다. 또한, 내부 화재나 해적의 공격에 의한 연기 유입에 취약할 수 있다. 그리고 우리 해군이나 다국적 해군에 의한 신속한 구출작전이 항상 가능할 수는 없기 때문에 부득이 장시간 거주 가능성을 감안하여 적절한 규모로 만들어

져야 한다.

Table 3-5 가운데 선원대피처 설치에 가장 유사할 것으로 판단되는 의  
료용도의 수면구역과 교정, 감호용도의 바닥면적은 각각  $11.1m^2/인$ ,  $13.1$   
 $m^2/인$ 이다. 이 바닥면적으로 화물선의 일반적인 승선정원인 20명을 대상으  
로 산출하면 필요한 바닥면적은 약  $222m^2 \sim 262m^2$ 가 된다.

Table 3-5 Occupant load factor<sup>18)</sup>

사용용도	$m^2/인$	사용용도	$m^2/인$
취사장	9.3	의료용도	
서가지역	9.3	입원치료구역	22.3
열람실	4.6	수면구역(구내숙소)	11.1
수영장	4.6 (물 표면)	교정, 감호용도	13.1
수영장 데크	2.8	주거용도	
헬스장	4.6	호텔, 기숙사	18.6
운동실	1.4	아파트	18.6
무대	1.4	대형 숙식주거	18.6
접근 출입구 좁은 통로, 회랑	9.3	공업용도	
카지노 등	1	일반 및 고위험공업	9.3
스케이트장	4.6	특수공업	수용인원이상
교육용도		업무용도	9.3
교실	1.9	창고용도(사업 용도 외)	수용인원이상
매점, 도서관, 작업실	4.6		

또한, 일본 건설성 공시 제1440호<sup>12)</sup>에서도 Table 3-6과 같이 적정 수용 인원을 산정하기 위한 계수를 정하고 있다. 이 표에서 선원대피처와 가장 유사한 것은 주택 이외의 건축물의 침실에 기타의 경우로서 0.16인/m<sup>2</sup>이다. 따라서 선원 20명에 대하여 필요한 바닥면적은 125m<sup>2</sup>가 된다. 결과적으로 미국과 일본 규정을 참조하면 최소 바닥면적 125m<sup>2</sup>(1인당 바닥면적 6.25 m<sup>2</sup>)이상이 필요하다.

Table 3-6 Occupant load factor<sup>12)</sup>

종 류		균중밀도 (단위: 인/m <sup>2</sup> )
주택의 거실		0.06
주택 이외의 건축물의 침실	고정 침대 (베드)의 경우	침대 수를 바닥면적으로 나눈 수치
	기타의 경우	0.16

#### 나. 피난구의 유효폭 산정

SOLAS 협약의 FSS Code 제13장의 탈출 수단 배치에 화물선의 계단과 복도의 폭은 70cm 되어야 한다. 그리고 계단으로 향하는 출입문은 그 계단의 폭과 같아야 한다<sup>16)</sup>는 규정에 의해 70cm 이상의 폭이 요구된다.

육상 건축물의 경우 우리나라는 건축물의 피난·방화규정 등의 기준에 관한 규칙에 비상탈출구의 유효 폭은 0.75m 이상으로 하고, 유효 높이는 1.5m 이상으로 할 것으로 규정하고 있다. 미국의 NFPA의 피난로의 구성 요소 및 설치 기준에 의하면 피난구의 유효 폭은 81cm 이상으로 규정하고 있다<sup>19)</sup>.

#### 다. 필요피난시간 계산

SFPE<sup>11)</sup>에 의하면 0.54인/m<sup>2</sup> 미만일 경우와 0.54인/m<sup>2</sup> 이상일 경우로 구분하여 필요피난시간을 계산한다. 식(3-1)은 0.54인/m<sup>2</sup> 미만일 경우의 계산 방법이다. 0.54인/m<sup>2</sup> 이상일 경우는 식(3-2)와 같다. 각 계수들은 식(2-1)~(2-5)에서 밝힌 바와 같다. 피난 인원은 선박의 일반적인 승선정원인 20명으로 하였다.

$$T_p = \frac{P}{(k - 0.266kD)W_e} \quad (3-1)$$

1인당 바닥면적이 6.25m<sup>2</sup>일 경우는 균중밀도(D)가 0.16인/m<sup>2</sup>이므로 식(3-1)로 계산한다. 이때 k는 피난 속도 상수로서 비상구일 경우 1.4를 적용한다. W<sub>e</sub>는 비상구의 유효 폭이므로 선박의 일반적인 폭을 감안하여 1m로 설정하였다. 단, 비상구는 하나만 있는 것으로 설정하였으며 계산 결과 필요피난시간은 14.9초가 된다.

$$T_p = \frac{P}{(1 - 0.266D)kDW_e} \quad (3-2)$$

1인당 바닥면적이 0.85m<sup>2</sup>인 경우는 균중밀도(D)가 1.17인/m<sup>2</sup>이므로 식(3-2)로 계산한다. k, W<sub>e</sub>은 식(3-1)과 동일하므로 계산하면 17.7초가 된다.

하지만 선박의 경우 연구결과<sup>20)</sup> 롤링과 피칭에 의해 보행속도가 감소된다. 이 연구에서는 18세에서 83세의 성인 150명을 대상으로 통로 및 계단

의 경사와 동요에 의한 보행속도를 검토하였다. 이때 종동요 및 횡동요 모두에서 동요주기 증가에 따라 약 15%정도 감소되는 것으로 나타났다.

위에서 구한  $0.85m^2/인$ 과  $6.25m^2/인$ 의 필요피난시간은 17.7초, 14.9초였다. 이 시간에 15%를 추가하면 선박에서의 필요피난시간은 각각 20.4초, 17.1초가 된다.



## 5. 화재시뮬레이션

### 가. FDS 개요 및 특징

FDS는 화재로 발생하는 유체의 흐름을 계산하는 전산유체역학모델의 하나이다. FDS는 실제적인 화재에 대한 문제를 해결하는데 사용되며 주로 연기 제어 및 스프링클러 동작에 대한 연구에 적용된다. 이 연구에서는 유효 피난시간을 구하기 위해 대피허용 한계온도 및 가시거리를 분석한다. FDS의 특징<sup>21)</sup>은 생성물이 두 개의 변수 혼합 분율 연소모델을 거쳐 추적되는 단일 스텝 화학반응을 이용한다. 그리고 복사열 전달은 회색가스에 대한 복사 수송방정식을 푸는 과정을 통해 모델에 포함된다. 일부 제한된 경우에는 광대역 모델을 사용한다. 또한, 모든 경계면의 속도 및 열적 특성과 연소 특성을 설정할 수 있다.

Fig. 3-5는 화재시뮬레이션 수행을 위한 순서도<sup>21)</sup>이다.

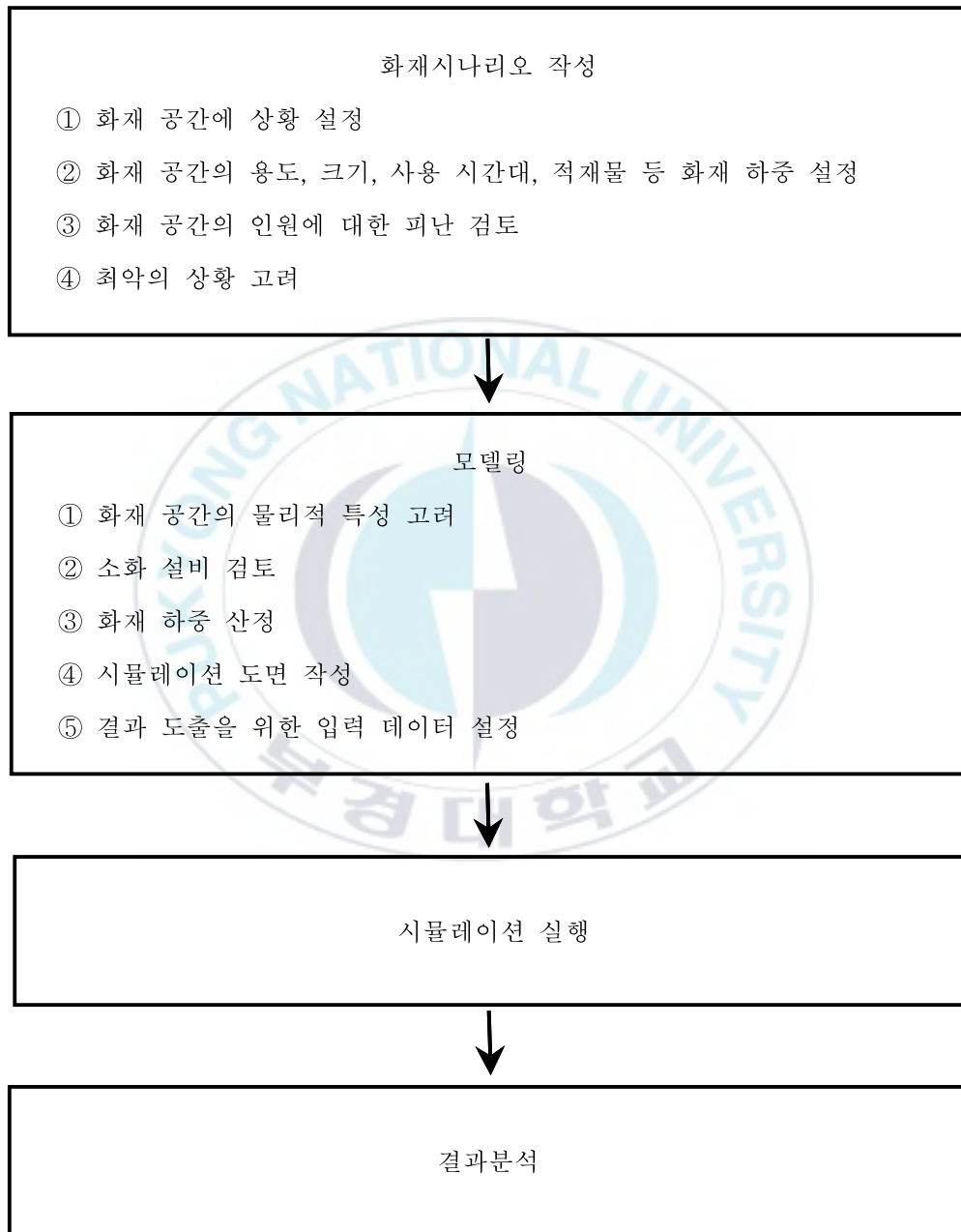


Fig. 3-5 Flow of fire simulation.

Fig. 3-6은 FDS를 이용하여 시뮬레이션을 수행할 경우 필요한 파일 형식의 변환 과정에 대한 도식이다. Fig. 3-7은 실제 작업의 예이다.

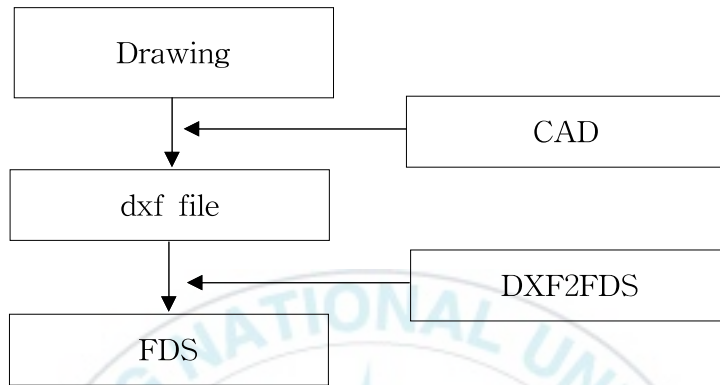


Fig. 3-6 Method of format conversion.

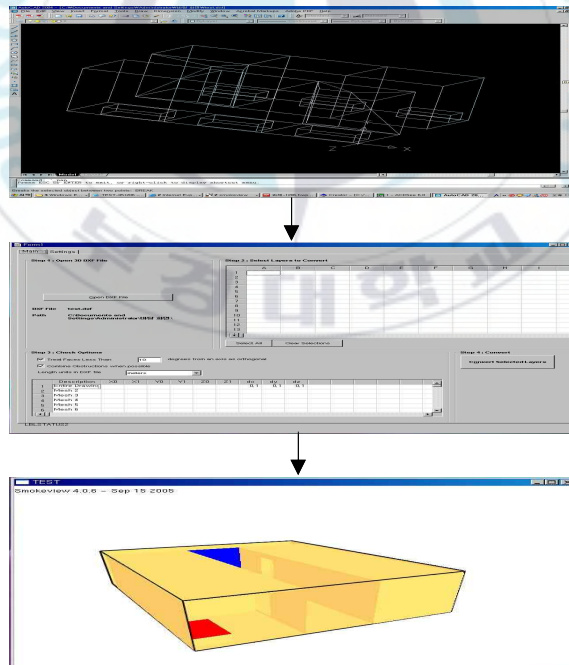


Fig. 3-7 Example of FDS format.

FDS는 미국 국립기술표준연구소(National Institute of Standards and Technology)에서 개발한 것으로 화재 시 유체 흐름을 분석하는 화재 전용 시뮬레이션 소프트웨어이다. 후처리 결과가 뛰어나 화재 분석 연구에 많이 사용되는 프로그램이다<sup>14)</sup>. FDS의 신뢰성을 검증하기 위해 철도터널 화재에 McGrattan과 Hamins<sup>22)</sup>가 연구를 수행하였으며 미국의 WTC(World Trade Center) 화재를 FDS로 분석하였다. 열 방출율에 대한 전반적인 형태는 잘 표현하고 있으며 상층부 가스의 피크 온도값은 실험 결과와 약 15% 정도 오차<sup>23)</sup>가 있었다. Fig. 3-8은 실제 WTC의 항공기 테러로 인한 화재를 FDS로 재현한 것이다<sup>24)</sup>.



Fig. 3-8 Comparison of real fire and simulation with FDS for WTC.

## 나. 시뮬레이션 분석

이 연구에서는 한국선급협회의 1인당 바닥면적  $0.85m^2$ 와 인명 안전 기준에 따른  $6.25m^2$ /인에 대하여 동일한 조건에서 시뮬레이션을 실시하고 결과를 비교하였다.

단, 거주구역의 높이는 기존 규정에 따라 2m를 기준으로 하였다. 그러나 대부분 거주구역이 아닌 특수한 곳에 선원대피처를 설치하므로 다양한 구역을 고려하여 높이를 3m, 4m, 5m로 구분하였다. 화재 규모도 다양하게 지정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 화재 시뮬레이션 조건은 Table 3-7과 같이 요약된다.

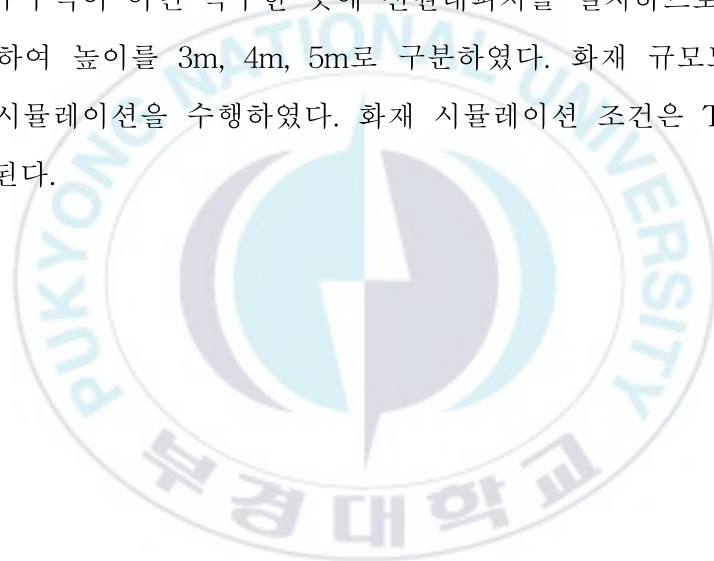


Table 3-7 Simulation parameters

항목	시뮬레이션 조건
선원대피처 바닥면적 ( $0.85m^2$ /인)	가로(m) : 4.1 세로(m) : 4.1 높이(m) : 2, 3, 4, 5
선원대피처 바닥면적 ( $6.25m^2$ /인)	가로(m) : 11.2 세로(m) : 11.2 높이(m) : 2, 3, 4, 5
시뮬레이션 시간	50 초
화재규모	10kW, 100 kW, 1MW
화원의 크기	1m × 1m
가연성 물질	목재
실내온도	25 °C

온도 및 가시거리 측정점은 비상시 피난구가 되는 출입문을 가정하여 Fig. 3-9에서 보는 바와 같이 기준점에서 x 축 및 y 축으로 각각 2m로 하였다. 그리고 z축은 사람의 호흡선 위치인 1.8m로 하였다.

유효피난시간은 온도는  $60^{\circ}C$ , 허용 가시거리는 5m로 규정<sup>14)</sup>하고 있다. 따라서 측정점에서의 온도가  $60^{\circ}C$ 에 도달하는데 걸리는 시간과 가시거리 5m 미만으로 떨어지는데 걸리는 시간을 계산한다. 이 중 짧은 시간을 피난 가능 시간으로 하였다.

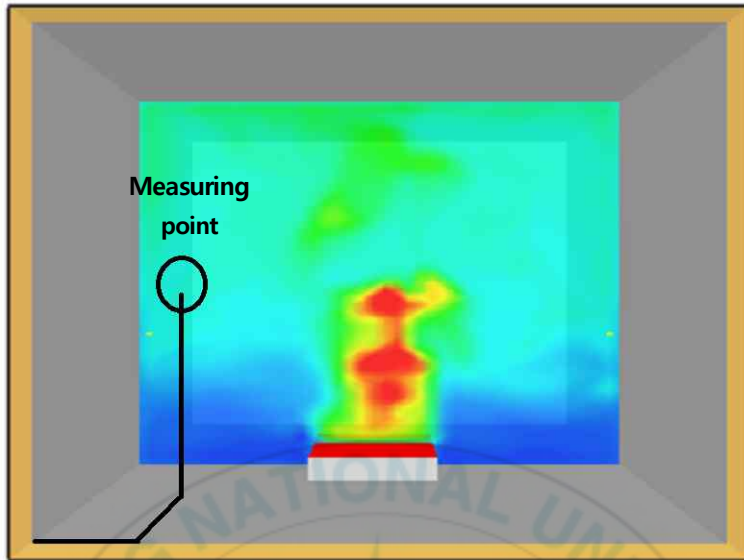


Fig. 3-9 Measuring point for temperature and visibility.



Table 3-8은 한국선급협회 기준인 1인당 바닥면적  $0.85m^2$ 의 규모로 선원대피처가 설치되었을 경우 대피허용 한계 온도인  $60^{\circ}C$ 에 도달하는 시간을 표로 나타낸 것이다. 그리고 최고온도 및 최고온도 도달시간은 전체 시뮬레이션 시간 50초에서 온도가 최대로 상승한 값과 그때 시간을 나타낸다. 온도 측정 결과 화재 규모가 10kW에서는 모든 높이에서  $60^{\circ}C$ 에 도달하지 않았다. 100kW에서는 4m 이하에서  $60^{\circ}C$ 에 도달하였으나 4m인 경우는 도달시간이 제4절에서 계산된 필요피난시간 20.4초를 초과하는 것으로 확인되었다. 그러나 1MW 시는 모든 조건에서  $60^{\circ}C$ 에 도달하는 시간이 필요피난시간 20.4초 이내로 나타났다. 즉, 1인당 바닥면적이  $0.85m^2$ 인 경우에는 10kW에 선원피난처의 모든 높이와 100kW에 높이가 4m 이상인 경우를 제외하고 모든 시나리오에서  $60^{\circ}C$ 에 도달하는 시간이 필요피난시간 20.4초 이내로 확인되었다. 즉, 모든 선원들의 피난 완료 전에 온도가  $60^{\circ}C$  이상으로 증가하여 인명 안전에 문제가 있는 것으로 나타났다. 자세한 내용은 Table 3-8과 같다.

**Table 3-8** Time to reach a temperature of 60 °C (0.85m<sup>2</sup>/person)

선원 대피 처 높이 (m)	10kW			100kW			1MW		
	최고 온도 (°C)	최고 온도 도달 시간(s)	60°C 도달 시간(s)	최고 온도 (°C)	최고 온도 도달 시간(s)	60°C 도달 시간 (s)	최고 온도 (°C)	최고 온도 도달 시간(s)	60°C 도달 시간 (s)
2	37.4	50	-	113.6	49	5	462.8	36	3
3	33.4	48	-	81.1	46	16	349.5	48	4
4	30.4	44	-	65.2	48	45	281.6	49	5
5	26.7	50	-	39.2	29	-	238.4	42	14

※ - 표시는 60°C 에 도달하지 않음을 의미함.

Table 3-9는 한국선급협회 기준인 1인당 바닥면적  $0.85m^2$ 의 크기로 선원대피처가 설치되었을 경우 대피허용 한계 가지거리인 5m에 도달하는 시간을 표로 나타낸 것이다. 그리고 최소 가지거리 및 최소 가지거리 도달시간은 전체 시뮬레이션 시간 50초에서 최소 가지거리와 최소 가지거리 도달시간을 나타낸다. 가지거리 측정 결과 화재 규모가 10kW에서는 모든 높이에서 5m에 도달하지 않았다. 100kW에서는 3m 이하에서 5m에 도달하였으나 3m인 경우는 도달시간이 제4절에서 계산된 필요피난시간 20.4초를 초과하였다. 그러나 1MW 시는 모든 조건에서 5m에 도달하는 시간이 필요피난시간 20.4초 이내로 나타났다. 즉, 1인당 바닥면적이  $0.85m^2$ 인 경우, 10kW에 선원피난처의 모든 높이와 100kW에 높이가 3m 이상인 경우를 제외하고 모든 시나리오에서 5m에 도달하는 시간이 필요피난시간인 20.4초 이내인 것으로 확인되었다. 즉, 모든 선원들의 피난 완료 전에 가지거리가 5m 이하로 감소되어 인명 안전에 문제가 있는 것으로 나타났다. 자세한 내용은 Table 3-9와 같다.

**Table 3-9** Time to reach the visibility of 5m (0.85m<sup>2</sup>/person)

선원 대피처 높이 (m)	10kW			100kW			1MW		
	최소 가시 거리 (m)	최소 가시 거리 도달 시간(s)	5m 도달 시간 (s)	최소 가시 거리 (m)	최소 가시 거리 도달 시간(s)	5m 도달 시간 (s)	최소 가시 거리 (m)	최소 가시 거리 도달 시간(s)	5m 도달 시간 (s)
2	19.8	50	-	3.2	49	15	0.4	50	3
3	30	50	-	5.0	48	48	0.7	47	6
4	30	50	-	7.0	48	-	0.8	49	12
5	30	50	-	11.2	47	-	1.0	50	19

※ - 표시는 5m에 도달하지 않음을 의미함.

Table 3-10은 1인당 바닥면적  $6.25m^2$ 의 크기로 선원대피처가 설치되었을 경우 대피허용 한계 온도인  $60^{\circ}C$ 에 도달하는 시간을 표로 나타낸 것이다. 그리고 최고온도 및 최고온도 도달 시간은 전체 시뮬레이션 시간 50초에서 온도가 최대로 상승한 값과 그때 시간을 나타낸다. 1MW의 화재에 높이 2m 이하일 경우를 제외하고 모든 시나리오에서  $60^{\circ}C$ 에 도달하는 시간이 제4절에서 계산된 필요피난시간 17.1초를 초과하는 것으로 확인되었다. 즉, 모든 선원들이 피난을 완료한 이후에 온도가  $60^{\circ}C$  이상으로 상승하여 인명 안전에 문제가 없는 것으로 확인되었다.

**Table 3-10** Time to reach a temperature of  $60^{\circ}C$  ( $6.25m^2$ /person)

선원 대피 처 높이 (m)	10kW			100kW			1MW		
	최고 온도 ( $^{\circ}C$ )	최고 온도 도달 시간(s)	$60^{\circ}C$ 도달 시간(s)	최고 온도 ( $^{\circ}C$ )	최고 온도 도달 시간(s)	$60^{\circ}C$ 도달 시간(s)	최고 온도 ( $^{\circ}C$ )	최고 온도 도달 시간(s)	$60^{\circ}C$ 도달 시간(s)
2	28.0	50	-	47.8	49	-	172	45	9
3	25.9	50	-	26.6	50	-	56.4	49	-
4	25.2	50	-	26.3	50	-	31.0	50	-
5	25.2	50	-	26.1	50	-	33.6	50	-

※ - 표시는  $60^{\circ}C$ 에 도달하지 않음을 의미함.

Table 3-11은 1인당 바닥면적  $6.25m^2$ 의 크기로 선원대피처가 설치되었을 경우 대피허용 한계 가지거리인 5m에 도달하는 시간을 표로 나타낸 것이다. 그리고 최소 가지거리 및 최소 가지거리 도달시간은 전체 시뮬레이션 시간 50초에서 최소 가지거리와 최소 가지거리 도달시간을 나타낸다. 1MW의 화재에 높이가 2m 이하일 경우를 제외하고 모든 조건에서 대피허용 한계값 5m에 도달하는 시간이 제4절에서 계산된 필요피난시간 17.1초를 초과하는 것으로 확인되었다. 즉, 모든 선원들이 피난을 완료한 후에 가지거리가 5m 이하로 감소되어 인명 안전에 문제가 없는 것으로 확인되었다.

**Table 3-11** Time to reach the visibility of 5 m ( $6.25m^2$ /person)

선원 대피 처 높이 (m)	10kW			100kW			1MW		
	최소 가지 거리 (m)	최소 가지 거리 도달 시간(s)	5m 도달 시간(s)	최소 가지 거리 (m)	최소 가지 거리 도달 시간(s)	5m 도달 시간(s)	최소 가지 거리 (m)	최소 가지 거리 도달 시간(s)	5m 도달 시간(s)
2	30	-	-	30	-	-	1.1	50	8
3	30	-	-	30	-	-	10.7	48	-
4	30	-	-	30	-	-	30	-	-
5	30	-	-	30	-	-	30	-	-

※ - 표시는 30m 유지 및 6m에 도달하지 않음을 의미함

즉, 1인당 바닥면적  $6.25m^2$ 인 경우에는 화재 규모 1MW, 높이 2m 이하에서만 유효피난시간에 도달하는 시간이 피난 완료 전인 것으로 확인되었다. 그러나 선원대피처의 높이가 3m 이상인 경우에는 비교적 화재 규모가 큰 경우에도 유효피난시간에 도달하는 시간이 피난을 완료한 이후이므로 인명 안전에 상당한 도움이 되는 것으로 확인되었다.



## 6. 소결론

현재 우리나라는 선원대피처의 1인당 바닥면적을  $0.85m^2$  이상으로 규정하고 있으나 높이에 대한 규정은 없다. 그러나 장시간 거주하여야 하는 선원대피처의 특성상 1인당 바닥면적  $0.85m^2$ 은 협소한 것으로 판단된다. 특히, 높이는 외부로부터의 연기유입 혹은 내부 화재 시 선원의 안전에 아주 중요한 요소임에도 그 규정이 없다.

그러므로 이 연구에서는 다양한 화재 규모로 시뮬레이션을 수행한 결과 기존 1인당 바닥면적인  $0.85m^2$ 로 선원피난처가 설치될 경우 화재의 크기가 100kW 이하, 높이가 3m 이상일 때만 유효피난시간에 도달하는 시간이 필요피난시간을 초과함을 확인하였다. 특히, 1MW의 화재 규모에서는 모든 시나리오에서 필요피난시간인 20.4초를 초과하지 못했다. 즉, 모든 선원들이 피난을 완료하기 전에 유효피난시간에 도달하여 인명 안전에 문제가 있는 것으로 나타났다.

그러나 본 논문에서 인명 안전을 고려하여 제시한 1인당 바닥면적  $6.25m^2$  이상, 높이 3m 이상일 경우에는 1MW 이하의 화재 시 모든 시나리오에서 유효피난시간에 도달하는 시간이 피난을 완료한 이후로 확인되어 인명 안전에 상당한 도움이 되는 것으로 나타났다.

## 제 IV 장 선박 거주구역 구조

### 1. 거주구역 높이

본 논문에서는 CFD기법을 이용하여 한국해양대학교 실습선 한바다호의 학생 거주구역에 대한 화재를 가상하여 유효피난시간 계산 요소인 온도 와 가시거리를 측정하였다. 특히, 한바다호의 경우는 상선 및 어선과는 달리 승선 경험이 적은 많은 실습생들이 장기간 승선하므로 위험에 대한 노출이 상대적으로 높다고 볼 수 있다. 즉, 많은 여객이 승선하는 여객선과 유사점이 있다고 볼 수 있다.

그리고 화재에 의한 사망율은 온도보다 질식으로 인한 경우가 높다. 질식으로 인한 사망률을 줄이기 위해서는 신속한 피난이 필수적이다. 이러한 이유로 본 논문에서는 기존의 거주구역 높이인 2m와 30cm 더 높은 2.3m를 비교하여 유효피난시간 향상율을 확인하고자 한다.

이 연구를 위하여 한바다호의 설계도면을 이용하여 FDS에 필요한 프로그래밍을 실시하였다. Fig. 4-1은 설계도면을 이용하여 제작한 한바다호이며 화재구역은 가장 많은 인원이 거주하는 학생구역을 설정하였다.

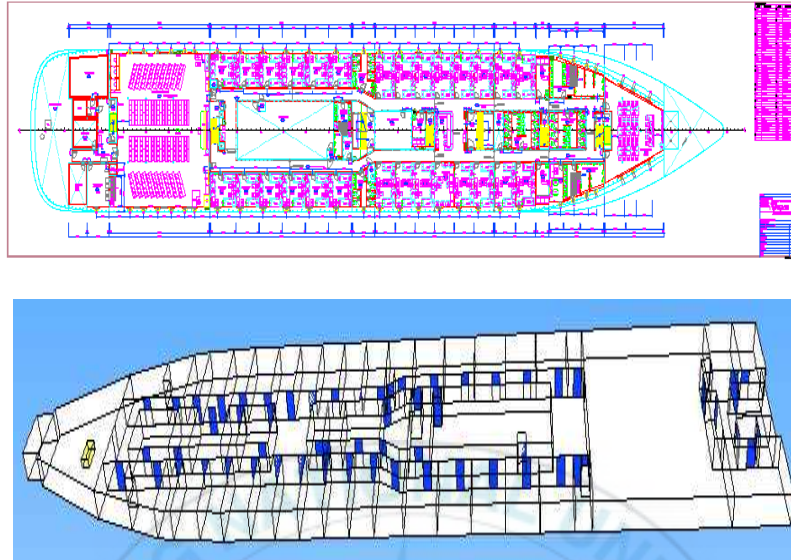


Fig. 4-1 Drawing of HANBADA.

Fig. 4-2에서 보는 바와 같이 온도 및 가시거리 측정은 화재 발생구역에서 10m, 20m, 30m 떨어진 지점에서 사람의 호흡선 위치인 바닥에서 1.8m 높이를 기준으로 하였다. 단, 선박의 우현과 좌현은 측정값이 거의 비슷할 것이므로 우현만을 측정하였다.

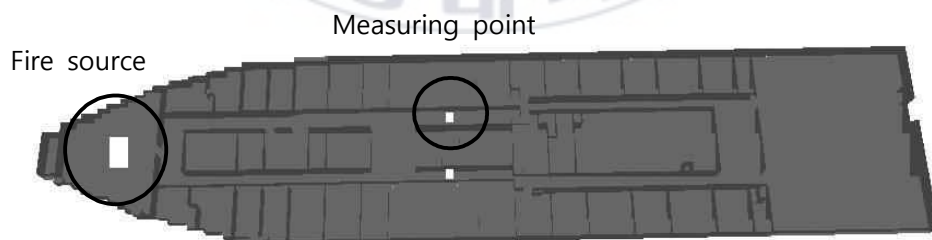


Fig. 4-2 Measuring point.

선박의 경우 SOLAS II-2의 FTP Code<sup>7)</sup>에서 화재 시험조건을 점화용 불꽃이 있을 경우  $50\text{kW}/\text{m}^2$ 에서 10분간 실시하도록 되어있다. 그러므로 Table 4-1에서 보는 바와 같이 10분간 목재에  $50\text{kW}/\text{m}^2$ 의 화재 규모로 시뮬레이션을 수행하였다.

**Table 4-1** Simulation parameters

항목	시뮬레이션 조건
시뮬레이션 시간	600 초
화재 규모	50kW
화원의 크기	1m × 1m
가연성 물질	목재
실내 온도	20 °C

온도 측정의 경우 Table 4-2에서 보는 바와 같이 화원에서 10m 떨어진 지점에서 60°C 도달 시간은 천장 높이를 30cm 증가했을 때 55.8초가 더 소요되어 유효피난시간은 136.8% 향상되는 것으로 확인되었다.

**Table 4-2** Time to reach a temperature of 60 °C

측정점(높이) 화원으로부터 거리	2.0m	2.3m	유효피난시간 향상율
10m	40.8s	96.6s	136.8%
20m	-	-	-
30m	-	-	-

※ - 표시는 60°C에 도달하지 않음을 의미함.

Fig. 4-3 ~ Fig. 4-5는 Table 4-2의 내용을 그래프로 자세히 나타낸 것이다. Fig. 4-3은 화원에서 10m 떨어진 지점에서 거주구역 높이가 2.0m와 2.3m인 경우 온도를 측정된 결과이다. 거주구역 높이가 2.0m인 경우 약 160초 후 대략 100℃까지 성장하였으나 2.3m인 경우에는 약 100초부터 대략 60℃를 유지함을 알 수 있었다. 즉, 거주구역의 높이를 2.3m로 높일 경우 화원에서 10m 떨어진 지점에서의 온도를 측정된 결과 대피허용 한계값인 60℃에 도달하지 않는 것으로 나타났다.

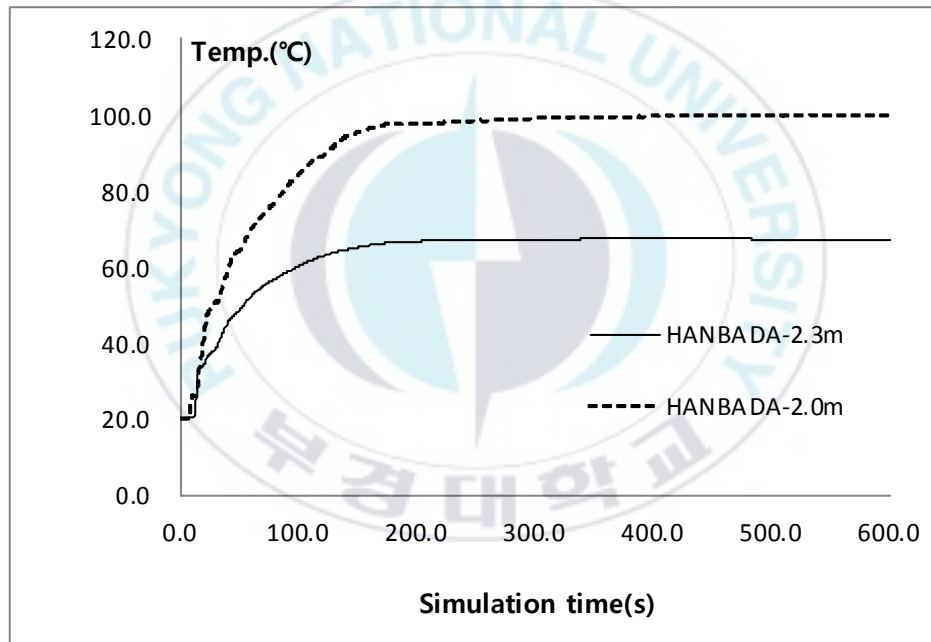


Fig. 4-3 Comparison of temperature variation with time at measuring point (10m from a fire source).

Fig. 4-4는 화원에서 20m 떨어진 지점에서 거주구역 높이가 2.0m와 2.3m인 경우 온도를 측정된 결과이다. 거주구역 높이가 2.0m인 경우 약 160초 후 대략 60℃까지 성장하였으나 2.3m인 경우에는 대략 40℃를 유지함을 알 수 있었다. 즉, 거주구역의 높이를 2.3m로 높일 경우 화원에서 30m 떨어진 지점에서의 온도를 측정된 결과 약 40℃로 대피허용 한계값인 60℃를 도달하지 않는 것으로 나타났다.

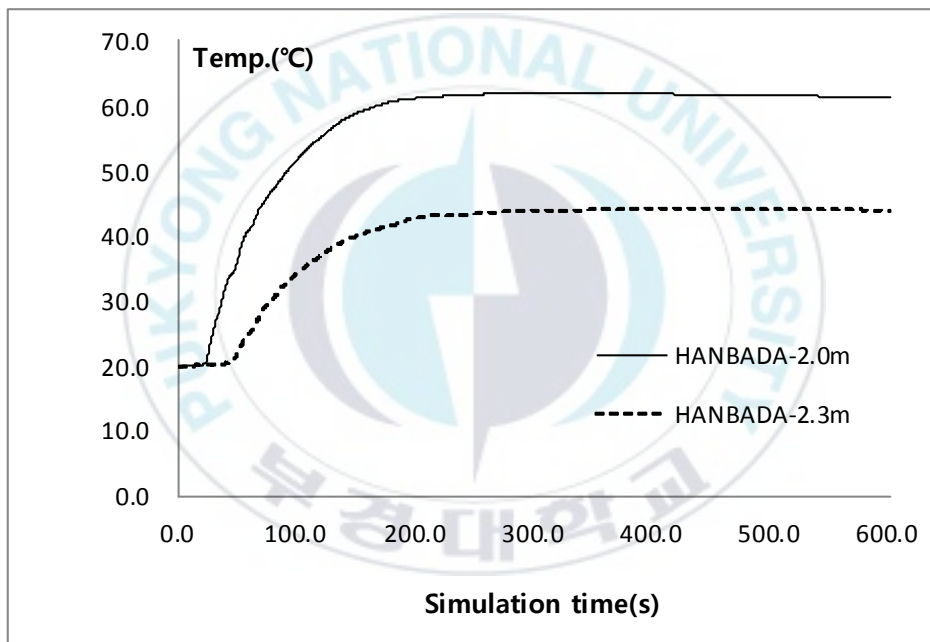


Fig. 4-4 Comparison of temperature variation with time at measuring point (20m from a fire source).

Fig. 4-5는 화원에서 30m 떨어진 지점에서 거주구역 높이가 2.0m와 2.3m인 경우 온도를 측정한 결과이다. 거주구역 높이가 2.0m인 경우 약 160초 후 대략 45℃까지 성장하였으나 2.3m인 경우에는 약 33℃를 유지함을 알 수 있었다. 즉, 거주구역의 높이를 2.3m로 높일 경우 화원에서 30m 떨어진 지점에서의 온도를 측정한 결과 약 33℃로 대피허용 한계값인 60℃에 훨씬 미치지 않는 것으로 나타났다.

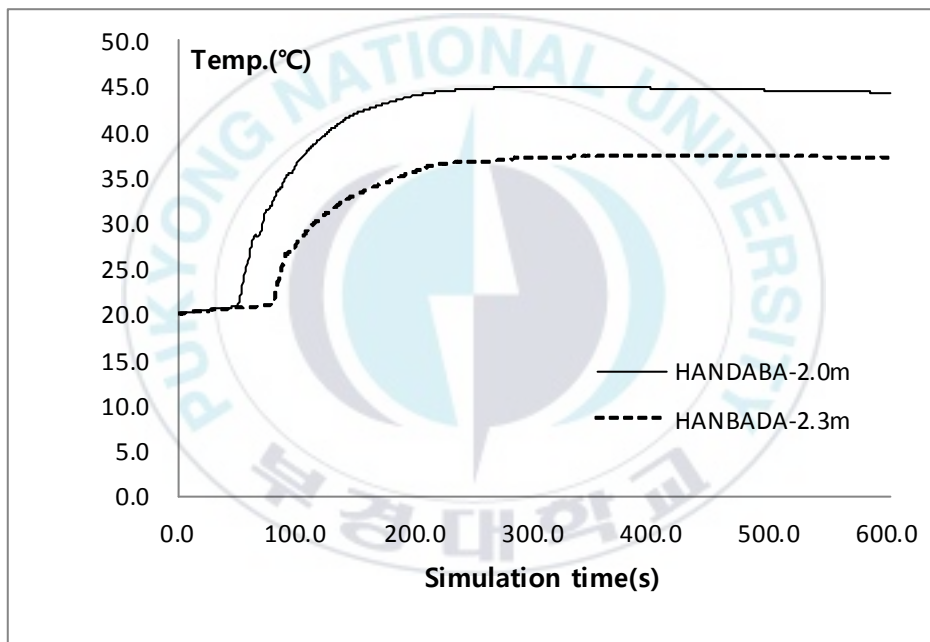


Fig. 4-5 Comparison of temperature variation with time at measuring point (30m from fire source).

가시거리는 Table 4-3에서 보는 바와 같이 측정점에서 대피 허용 한계 값인 5m에 도달하는 시간을 나타낸 표이다. 화재구역에서 10m 떨어진 지점은 27.1초, 20m 지점에서는 109.2초나 증가함을 확인하였다. 30m 지점에서는 매연농도가 낮아져 73.3초만 증가하였다. 특히, 화원에서 20m 떨어진 지점에서는 유효피난시간이 118.2% 증가하는 것으로 확인되었다. 즉, 거주 구역 높이를 2.3m로 높일 경우 유효피난시간이 향상되어 인명 안전에 도움이 된다는 사실을 확인하였다.

**Table 4-3** Time to reach the visibility of 5m

측정점(높이) 화원으로부터 거리	2.0m	2.3m	유효피난시간 향상율
10m	58.2s	85.3s	46.6%
20m	92.4s	201.6s	118.2%
30m	160.8s	234.1s	45.6%

Fig. 4-6 ~ Fig. 4-8에서 보는 바와 같이 화재 시 가시거리는 급속하게 낮아짐을 알 수 있는데 이는 초기진화 및 소화 불가 시에는 빠른 피난이 필요하다는 것을 나타낸다. Fig. 4-6 ~ Fig. 4-8은 Table 4-3의 내용을 그래프로 자세히 나타낸 것이다. Fig. 4-3은 화원에서 10m 떨어진 지점에서 거주구역 높이가 2.0m와 2.3m에 대한 가시거리 측정 결과를 나타낸 것이다. 거주구역 높이가 2.0m인 경우 58.2초 후 대피허용 한계값인 5m에 도달하였다. 그리고 2.3m인 경우에는 85.3초에 도달하였다. 즉, 화원에서 10m지점의 가시거리를 측정한 결과 유효피난시간은 46.6% 향상되는 것으로 나타났다.

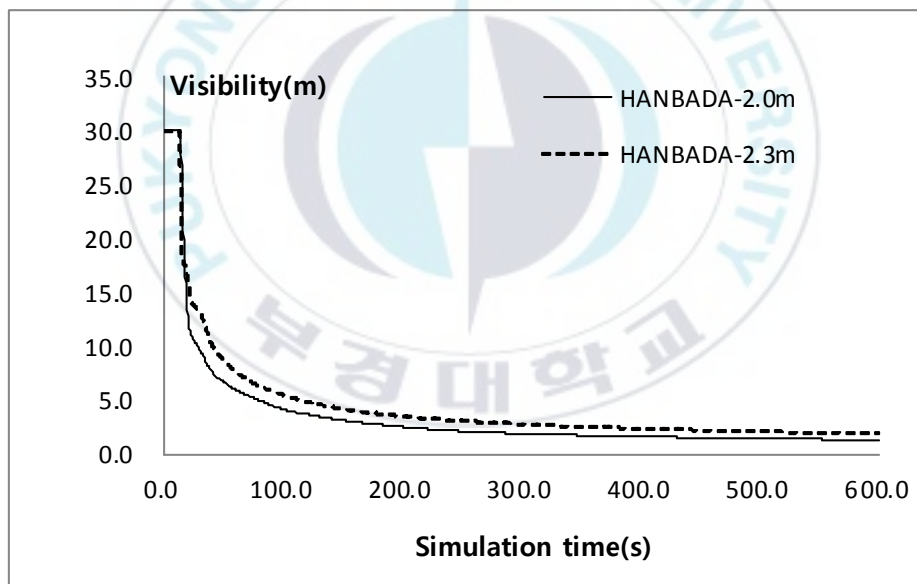


Fig. 4-6 Comparison of visibility variation with time at measuring point (10m from fire source).

Fig. 4-7은 화원에서 20m 떨어진 지점에서 거주구역 높이가 2.0m와 2.3m에 대한 가시거리 측정 결과를 나타낸 것이다. 거주구역 높이가 2.0m인 경우 92.4초 후 대피 허용 한계값인 5m에 도달하였다. 그리고 2.3m인 경우에는 201.6초에 도달하였다. 즉, 화원에서 10m지점의 가시거리를 측정 한 결과 유효피난시간은 118.2% 향상되는 것으로 나타났다.

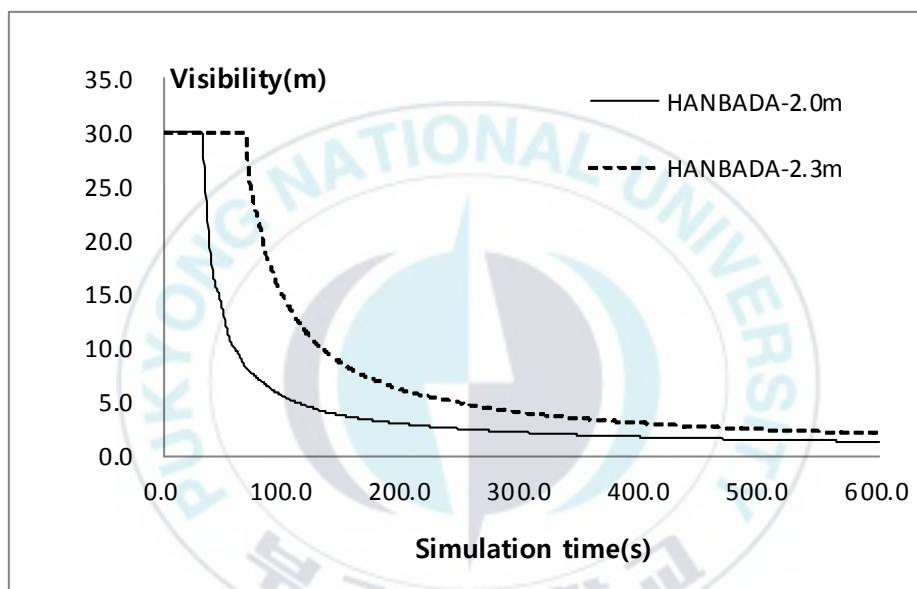


Fig. 4-7 Comparison of temperature variation with time at measuring point (20m from a fire source).

Fig. 4-8은 화원에서 30m 떨어진 지점에서 거주구역 높이가 2.0m와 2.3m에 대한 가시거리 측정 결과를 나타낸 것이다. 거주구역 높이가 2.0m인 경우 160.8초 후 대피허용 한계값인 5m에 도달하였다. 그리고 2.3m인 경우에는 234.1초에 도달하였다. 즉, 화원에서 10m지점의 가시거리를 측정 한 결과 유효피난시간은 45.6% 향상되는 것으로 나타났다.

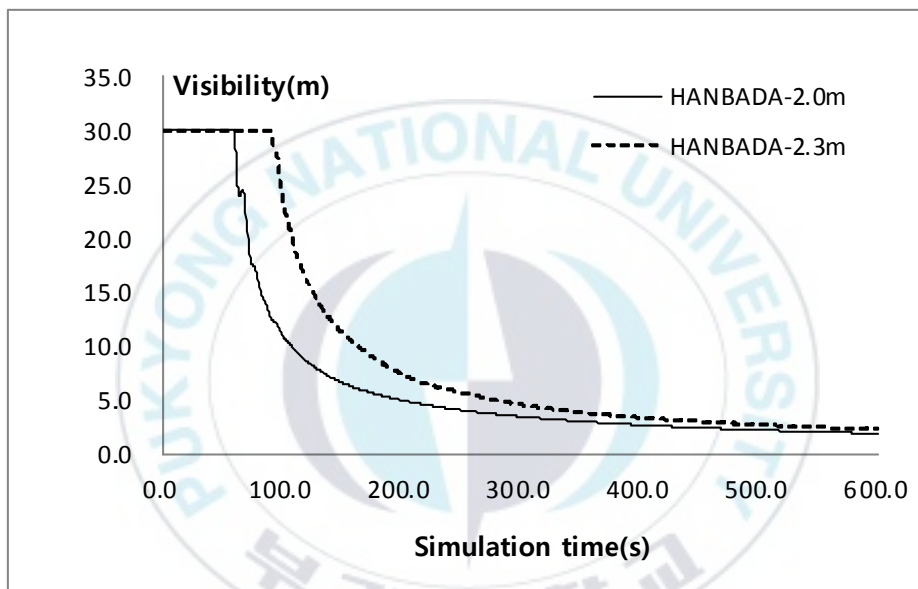


Fig. 4-8 Comparison of temperature variation with time at measuring point (30m from a fire source).

## 2. 복도 및 피난구 폭

Table 4-4는 시뮬레이션을 위한 조건으로 한국해양대학교 한바다호에서 가장 많은 인원이 거주하는 학생 침실에 대해 수행하였다. 화재는 철도 차량 및 일반 차량에 일반적으로 적용되는 1MW를 설정하였다. 화원은 선박 화재의 가장 큰 원인이며 위험할 것으로 예상되는 유류를 선정하였다. 단, 유류는 FDS에서 데이터를 지원하는 등유로 하였다.

Table 4-4 Simulation parameters

항목	시뮬레이션 조건
시뮬레이션 시간	120 초
화재규모	2MW
화원의 크기	1m × 1m
가연성 물질	등유
실내온도	20 °C

Fig. 4-9는 시뮬레이션 수행을 위해 제작된 한바다호의 FDS 모형이다.

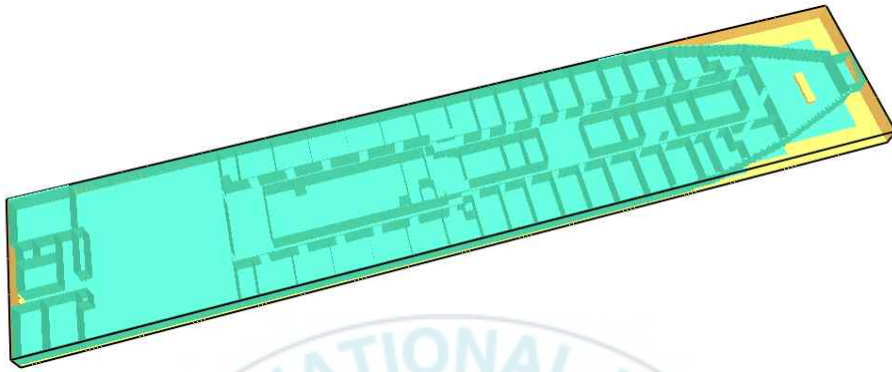


Fig. 4-9 Computational domain for FDS.

유효피난시간 계산에 필요 요소인 온도 및 가시거리에 대한 측정위치는 화원에서 10m 간격으로 최대 50m로 하였다. 그리고 높이는 사람의 호흡선인 1.8m를 기준으로 측정하였다. 가시거리의 경우 발광표지의 경우 무차원 특성상수인  $C$ 를 8, 반사표지의 경우  $3^{10}$ 이라는 기준을 이용한다. 선박은 IMO symbol이라는 반사표지를 사용하고 있기 때문에 본 논문에서는 상수 3에 의한 가시거리를 검토한다.

Fig. 4-10은 화원에서 10m 간격으로 최대 50m까지의 온도 측정 결과를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 보는 바와 같이 화원에서 10m 떨어진 지점에서는 약 15초 후 그 온도가 150°C로 급격하게 상승함을 알 수 있다. 그리고 20m지점에서는 약 15초 후 70°C 정도로 상승하여 전체적으로 80°C 까지 상승함을 알 수 있다. 그러나 나머지 조건에서는 40°C 이하를 유지함을 확인하였다.

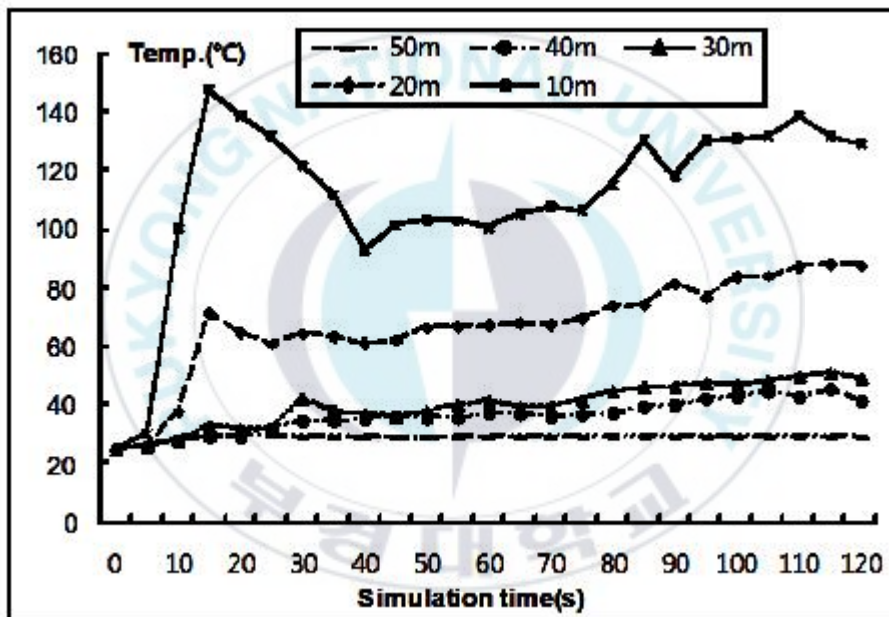


Fig. 4-10 Variation of temperature with time for distance form fire source.

Fig. 4-11은 화원에서 10m 간격으로 최대 50m까지의 가시거리 측정 결과를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 보는 바와 같이 화원에서 10m와 20m 떨어진 지점에서는 약 10초 이내에 대피허용 한계값인 5m 이하로 급격하게 감소함을 알 수 있다. 약 65초 이후에는 모두 5m 이하로 가시거리가 감소됨을 확인하였다.

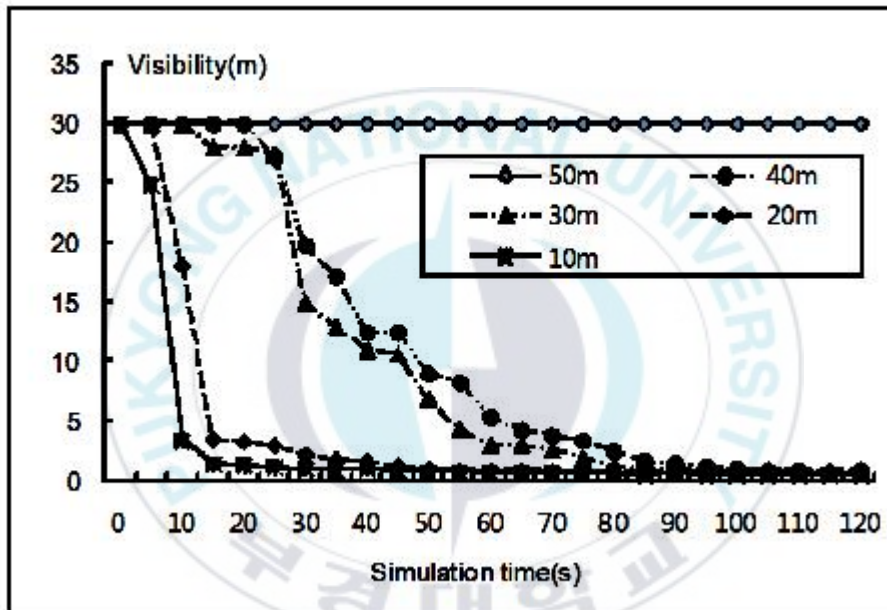


Fig. 4-11 Variation of visibility with time for distance form fire source.

피난 분석의 경우 학생 침실구역 화재를 가정하여 학생들의 피난 소요시간을 예측하였다. 예측 방법은 피난전용 분석 프로그램인 Pathfinder<sup>13)</sup>를 이용하였다. Fig. 4-12는 Pathfinder의 계산 영역이다. 피난 조건은 실제와 동일하게 총 26개 침실에 4명(총 104명)이 거주하는 것으로 가정하였으며 화재 발생구역은 Fig. 4-2에서 보는 바와 같이 선수 부분 학생 독서실로 하였다.

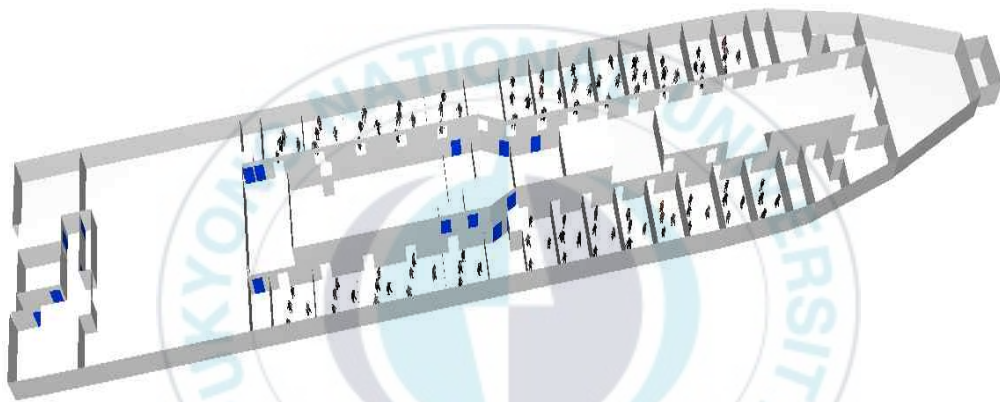


Fig. 4-12 Computational domain for Pathfinder.

시뮬레이션 결과 총 104명의 학생들은 모두 96초 후 피난 완료하는 것으로 확인되었다. 그리고 화원 10m 안에 있는 학생들은 6초 이전에 탈출을 감행하였다. 단, 피난 준비시간은 감안하지 않았음을 밝혀둔다. Fig. 4-13은 시간에 따른 피난 인원을 그래프로 표현한 것으로 y 축은 피난 인원을 x 축은 필요피난시간을 의미한다. 피난 인원은 피난구 도착 시간 및 유출 계수로 인해 약 20초 후 본격적으로 피난구를 통해 대피하는 것으로 나타났다.

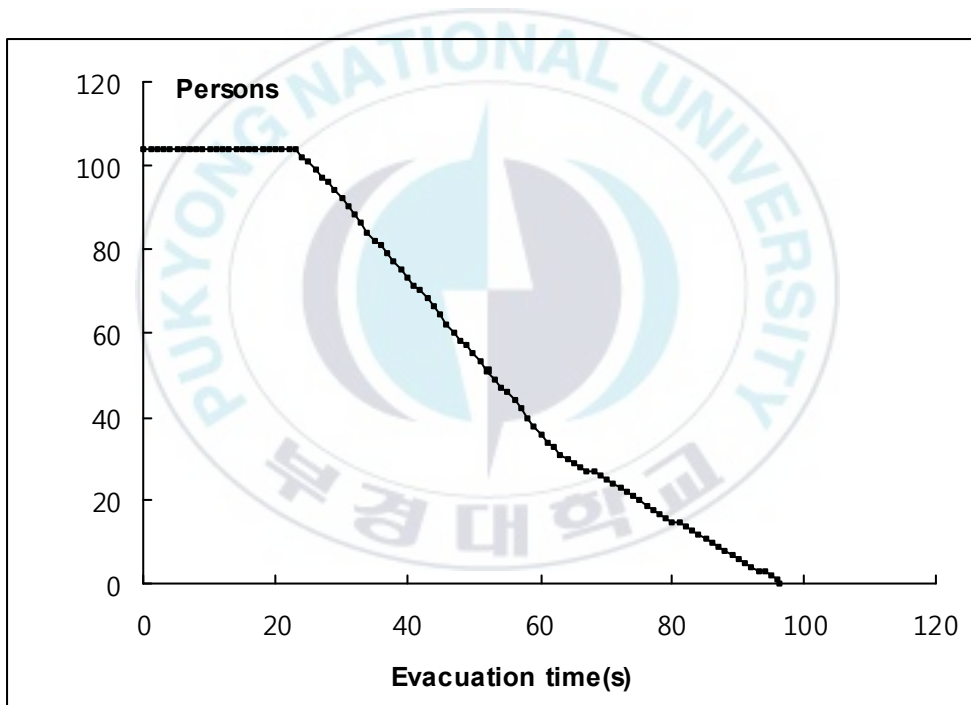


Fig. 4-13 Result of evacuation simulation.

Fig 4-14와 4-15는 FDS를 이용한 화재 시뮬레이션 후 연기 거동과 Pathfinder를 이용한 피난 시뮬레이션 결과를 동시간대로 표현한 것으로 학생의 피난이 연기의 확산보다 빨리 이루어짐을 알 수 있다. 단, 학생들이 피난 준비가 완료된 시점에서 시뮬레이션을 수행하였으므로 초기 지연시간은 감안하지 않았음을 밝혀둔다.

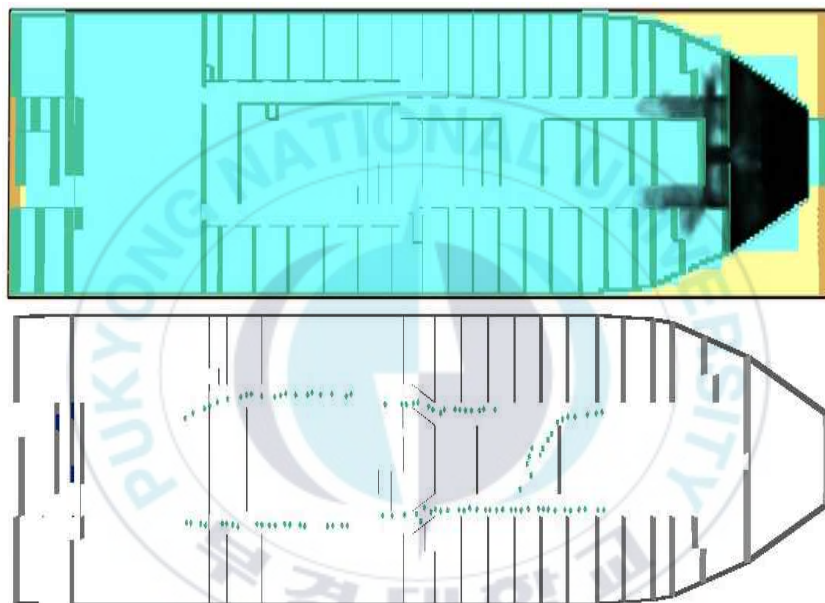


Fig. 4-14 Comparison of fire simulation and evacuation simulation(Simulation time 6s).

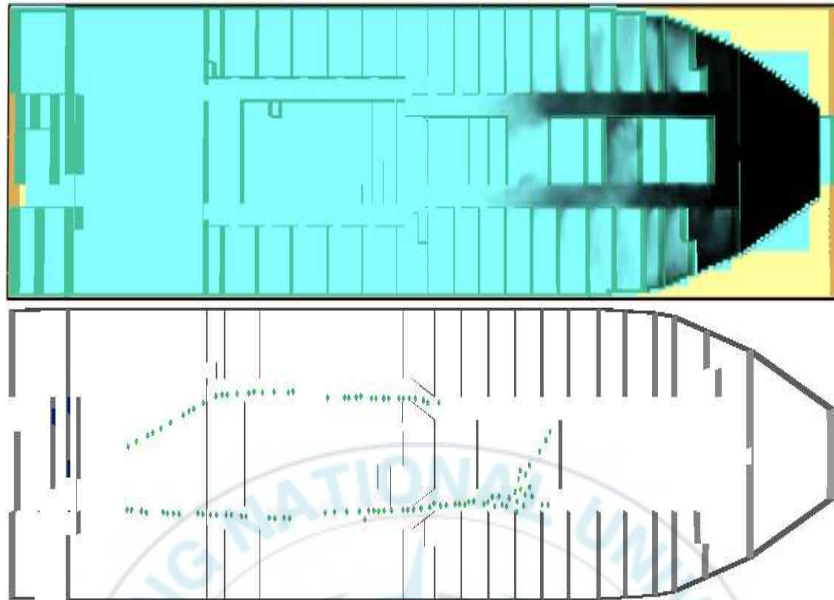


Fig. 4-15 Comparison of fire simulation and evacuation simulation(Simulation time 12s).

(1) 복도폭 증가

SOLAS FSS Code 제 13장의 탈출 수단 배치<sup>17)</sup>에 여객선과 화물선을 구분하여 규정하고 있다. 이 중 화물선은 계단과 복도의 실제 통과 폭이 70cm 이상이어야 하며 그 한 쪽에 핸드레일이 부착되어야 한다고 규정되어 있다. 선박의 복도 폭은 구조에 따라 다르지만 일반적으로 약 1m 정도이다. Fig. 4-16에 의하면 군중 밀도가 0.5(바닥면적 100m<sup>2</sup>에 군중이 50명인 경우)일 경우가 폭이 1m보다 50cm가 증가한 1.5m인 경우 필요피난시간이 급격하게 (17.8초) 줄어든 것을 확인하였다. 결과적으로 군중밀도가 0.5명/m<sup>2</sup>보다 낮은 경우에는 복도의 폭을 넓히는 것은 피난속도 감소에 미치는 영향이 크지 않으나 0.5명/m<sup>2</sup> 이상일 경우는 영향이 큼을 확인하였다. 즉, 군중 밀도가 0.5명/m<sup>2</sup> 이상 일 경우 복도 폭 50cm 증가 시 필요피난시간 감소에 도움이 되는 것으로 확인되었다.

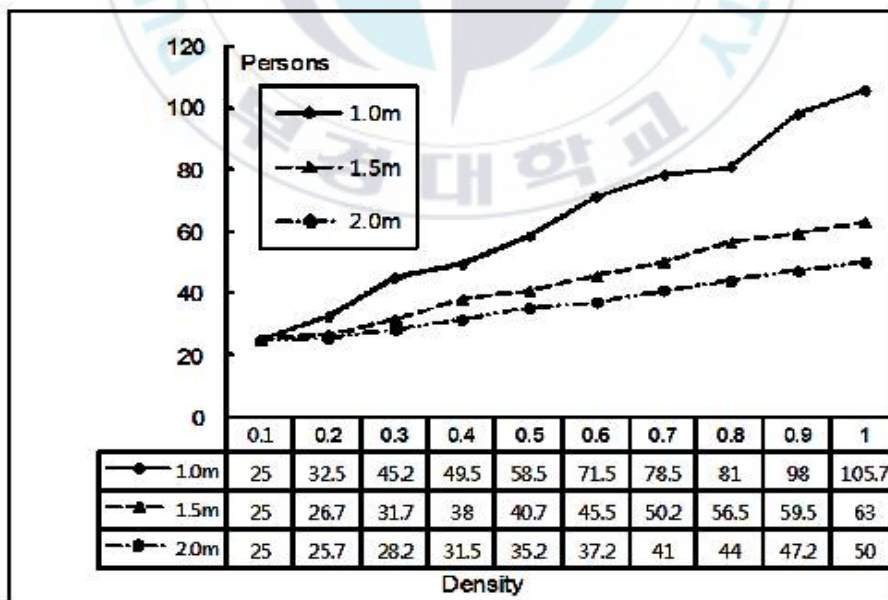


Fig. 4-16 Evacuation persons according to corridor width.

(2) 피난구 폭의 증가

모든 피난 인원은 결국 피난구로 모여들 수밖에 없다. 많은 사람이 제한된 피난구로 모여들기 때문에 병목현상이 발생한다. 피난구를 통해 밖으로 나가는 것으로 계수로 표현한 것이 유출계수이다. 즉, 피난구 폭의 증가는 유출계수 값을 향상시켜 피난에 도움이 된다. Fig. 4-17에 의하면 군중 밀도가 0.2명/m<sup>2</sup>까지는 피난구 폭 증가에 큰 의미가 없었으나 0.3명/m<sup>2</sup> 이상에서는 50cm 증가 시 6초, 1m 증가 시 8.5초가 감소하였다. 즉, 군중밀도가 0.3명/m<sup>2</sup> 이상일 경우 피난구 폭을 50cm 증가시키면 필요피난시간 감소에 도움이 되는 것으로 확인되었다.

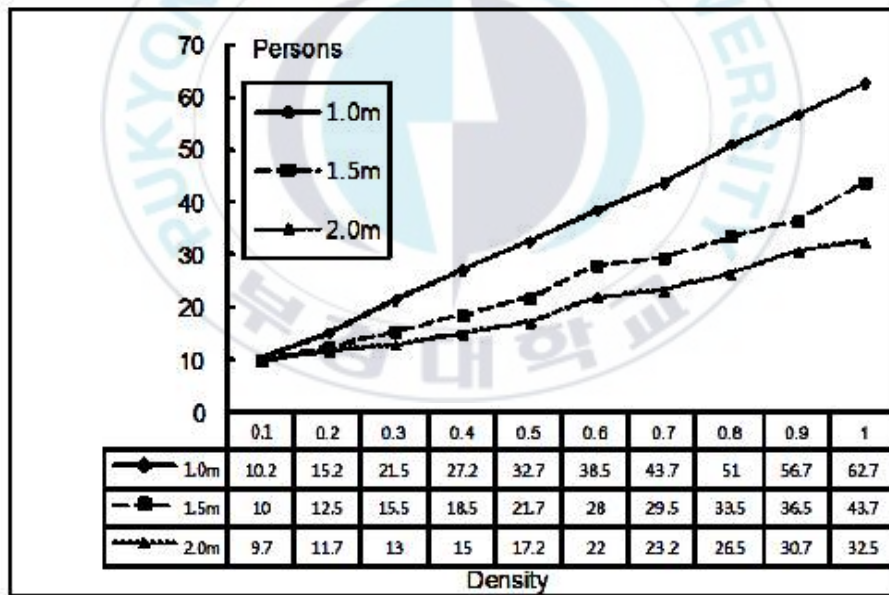


Fig. 4-17 Evacuation persons according to exit width.

### 3. 제연경계벽

기존 선박은 화재 경보 발령 시 방화문이 자동적으로 폐쇄되어 화재 확산을 막는다. 그러나 피난을 완료하지 못한 방화문 안쪽에 위치한 선원들에게는 치명적일 수 있다. 이런 이유로 선박에는 설치되어 있지 않은 제연경계벽 설치가 유효피난시간 증가에 미치는 영향을 연구할 필요가 있다. 화재시물레이션은 한국해양대학교 실습선을 대상으로 하여 Table 4-5와 같이 설정하였다.

Table 4-5 Simulation parameters

항 목	수 치 (m)
복도 길이	36.85
복도 폭	1.20
천장 높이	2.42

이 시물레이션을 위한 물리적 조건은 Table 4-6과 같이 거주구역에서 가장 많이 발생할 수 있는 목재를 화원으로 설정하였다. 온도 및 가지거리 측정점은 Fig. 4-18에서 보는 바와 같이 x 축은 복도의 중간점인 0.6m, y 축은 학생들의 피난 완료 지점인 복도 끝단 35m 그리고 z 축은 사람의 호흡 위치인 1.8m로 하였다.

시뮬레이션의 경우 방화문이 열려 있는 상황과 제연경계벽의 길이가 각각 20cm, 30cm, 40cm일 경우로 다양하게 하였으며 간격은 10m이다.

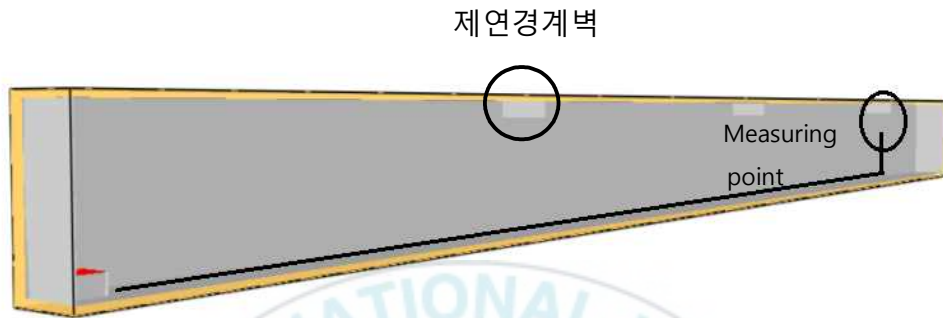


Fig. 4-18 Measuring point.

Table 4-6 Simulation parameters

항목	시뮬레이션 조건
시뮬레이션 시간	100 초
화재 규모	100kW
화원의 크기	60m × 60m
가연성 물질	목재
실내온도	20 °C

Table 4-7에서 보는 바와 같이 모든 시뮬레이션에서 대피 허용온도 60°C를 초과하지 않는 것으로 확인되었다. 온도 감소율은 제연경계벽의 길이가 20cm일 경우는 차이가 없었다. 그러나 30cm일 경우는 제연경계벽이 없는 경우에 비해 2.2°C가 감소하여 온도 감소율이 6.6% 향상되었다. 또한, 40cm일 경우는 6.3°C가 감소하여 18.9%가 향상되었다.

**Table 4-7** Time to reach a max. temperature

상태	최고 온도(°C)	온도 감소율 (%)
방화문 없음	33.3	-
제연경계벽 20 cm	33.3	-
제연경계벽 30 cm	31.1	6.6
제연경계벽 40 cm	27.0	18.9

Table 4-8에서 보는 바와 같이 가시거리는 5m 이상을 모든 시뮬레이션에서 만족하는 것으로 나타났다. 특히, 제연경계벽의 길이가 30cm 이상인 경우는 FDS의 최대 측정 거리인 30m를 유지하였다. 가시거리 감소율 측정 결과 제연경계벽의 길이가 20cm인 경우에는 제연경계벽이 없는 경우에 비해 가시거리가 13.5m에서 21.2m로 57.0%가 향상되었다. 특히, 30cm 이상일 경우는 연기로 인한 가시거리의 감소가 없는 것으로 나타났다.

**Table 4-8** Time to reach the min. visibility

상태	최소 가시거리(m)	가시거리 향상율(%)
방화문 없음	13.5	-
제연경계벽 20 cm	21.2	57.0
제연경계벽 30 cm	30이상	가시거리 영향 없음
제연경계벽 40 cm	30이상	가시거리 영향 없음

Fig. 4-19는 복도에 방화문이 없는 경우 온도 상승 및 연기 이동 정도를 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 4-20은 제연경계벽이 40cm 설치된 상황의 시뮬레이션으로 온도 상승 및 연기 이동 정도를 알 수 있다. 특히, 측정점인 피난구 방향은 온도 상승 및 연기가 거의 없는 것을 확인할 수 있다.

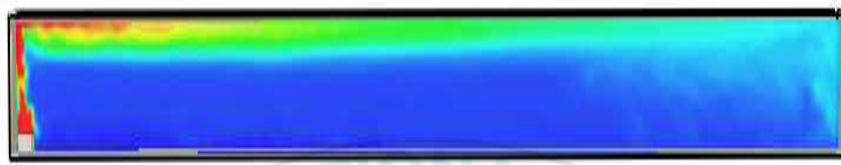


Fig. 4-19 Temperature distribution without draft curtain.

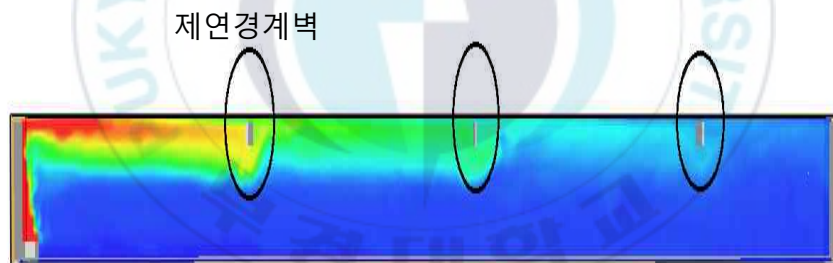


Fig. 4-20 Temperature distribution with 40cm long draft curtain.

Fig. 4-21은 방화문이 개방된 상황의 매연농도 및 연기 이동을 나타낸 것이다. Fig. 4-22는 40cm의 제연경계벽이 설치된 상황의 연기 이동 정도를 나타낸 것으로 측정점인 피난구 방향은 연기가 거의 없음을 확인할 수 있다.



Fig. 4-21 Visibility distribution without draft curtain.



Fig. 4-22 Visibility distribution with 40cm long draft curtain.

#### 4. 필요피난시간 분석

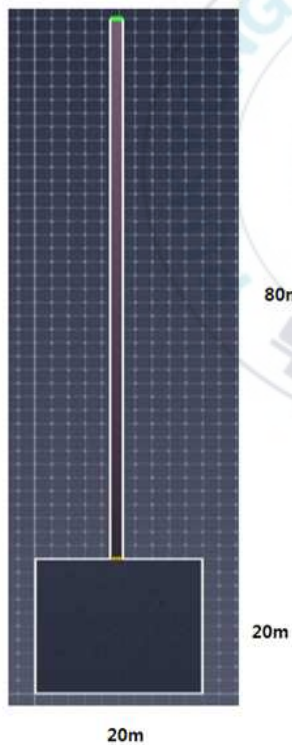
이 절에서는 세월호 사건을 계기로 선박에서 피난할 경우 발생할 수 있는 다양한 상황을 시나리오로 설정하였다. 이러한 시나리오에 대하여 선박 구조 개선이 필요피난시간 감소에 미치는 영향을 계산하였다. 세월호 도면은 세부 도면이 아닌 언론에 공개된 도면을 참고하여 유사하게 제작하였다. 인원수 및 장소는 고등학생 353명이 머물렀던 3층을 기준으로 하였다. 단, 이 연구는 선박 구조 개선이 필요피난시간 향상에 미치는 영향에 대한 것이다. 즉, 피난 준비시간, 경사각, 선박 동요에 의한 보행속도 감소 등 각종 피난에 지장을 주는 조건은 적용되지 않았음을 밝혀둔다. 실제 여러 가지 피난 장애요소가 발생한 세월호의 상황과는 상당한 차이가 있다.

이 연구에서는 피난전용 프로그램인 Pathfinder<sup>8)</sup>를 이용하였다. Table 4-9는 선박 피난 시 일어날 수 있는 다양한 상황을 항해사의 의견을 참고하여 설정된 시나리오이다.

Table 4-9 Evacuation scenarios

시나리오 번호	시나리오 내용
1	병목구간 설정
2	병목구간 + 통로 장애물 설정
3	계단이동 (경사각) 설정
4	층 피난 설정
5	선실 피난 설정

시나리오 1은 승객 및 선원들이 피난을 위한 집합 장소에서 동시에 피난하는 상황이다. 실제 선박에는 피난 집합장소가 있다. 특히, 여객선은 선원의 지시를 따르기 위해 특정장소에 집합이 필수적이다. 시뮬레이션 계산 영역은 가로(20m), 세로(20m)이며 총 80m를 이동하는 시나리오이다. 복도의 폭과 승객의 수는 Table 4-10과 같이 다양하게 적용하여 분석하였다. 그리고 Fig. 4-23은 시뮬레이션 계산 영역이다. 피난시뮬레이션 결과 통로 폭이 증가함에 따라 필요피난시간이 감소되었다. 특히, 1.0m에서 1.5m로 확장할 경우 증가율이 높았다.



**Table 4-10** Evacuation time for bottleneck scenario

통로 폭(m)	통과시간(s)	
	50명	100명
1.0	113.8	151.0
1.5	94	115.8
2.0	89	102.3
2.5	86.3	95.3

**Fig. 4-23** Drawing of scenario 1.

시나리오 2는 피난을 위한 집합 장소에서 승객 및 선원들이 동시에 피난하는 경우로 통로에 장애물이 있는 상황이다. 선박은 움직일 수 있는 물건을 고박하는 것이 일반적이다. 그러나 세월호 사건시 각종 물건들이 통로를 막고 있었다는 것을 언론매체를 통해 알 수 있었다.

가로(20m), 세로(20m)의 집합 공간에서 총 80m를 이동하는 시나리오이다. 통로 폭은 1.5m로 장애물은 출입구에서 20m간격으로 지그재그로 3개, 크기는 가로 및 세로 1m로 하였다. 승객의 수는 Table 4-11과 같이 다양하게 적용하였다. 그리고 Fig. 4-24는 시뮬레이션 계산 영역이다.

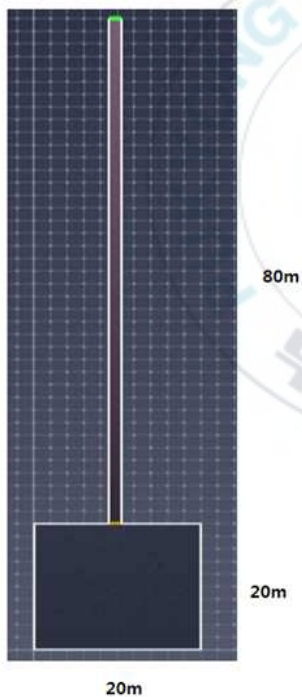


Table 4-11 Evacuation time for bottleneck and obstacles scenario

통로 폭(m)	통과시간(s)	
		50명
1.5	168.8	258.3

Fig. 4-24 Drawing of scenario 2.

시나리오 3은 계단 이동에 대한 상황이다. 계단의 각도는 Table 4-12에서 보는 바와 같이 30도와 45도로 설정하였다. 가로 20m, 세로 100m의 공간에 집합하였다가 피난하는 시나리오이다.

**Table 4-12** Evacuation time for moving stairs scenario

통로 폭(m)	통과 시간(s)	
	30도	45도
1.0	373.5	412
1.5	212	244.8
2.0	154	180.5
2.5	126	146

시나리오 4는 계단을 이용하여 안전한 층으로 피난하는 상황이다. 자세한 내용은 Table 4-13과 같고 Fig. 4-25는 시뮬레이션 계산 영역이다. 공간은 가로 20m, 세로 100m이며 계단의 경사각은 30도와 45도이다.

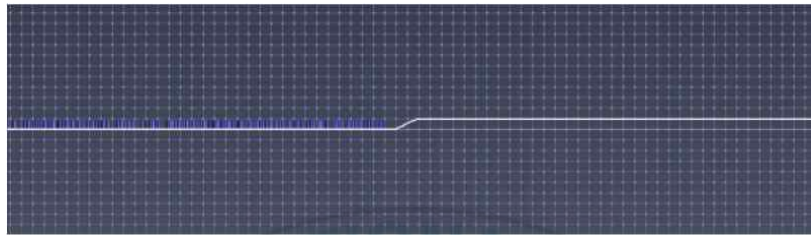


Fig. 4-25 Drawing of scenario 4.

Table 4-13 Evacuation time for floor evacuation scenario

계단 폭(m)	통과 시간(s)	
	30도	45도
1.0	450.5	486.3
1.5	291.3	324.3
2.0	237.3	262.0
2.5	207.0	226.5

시나리오 5는 언론에 공개된 세월호 도면을 참조하여 유사하게 제작하였다. 최악의 상황을 고려하여 한 방향 출구만 이용한 피난을 가정하여 필요 피난시간을 시뮬레이션 하였다. Fig. 4-26은 시뮬레이션 계산 영역이다. 본 논문은 선박 구조 개선이 피난 효율에 미치는 영향에 대한 것으로 보행속도 감소 및 각종 피난에 지장을 주는 조건은 적용되지 않았다. 실제로는 다양한 피난 장애 요소로 필요피난시간이 많이 증가될 것이다. Table 4-14에 의하면 피난구의 폭이 1.0m에서 2.5m로 확장될 경우 필요피난시간이 172.5초 감소하는 것으로 확인되었다.

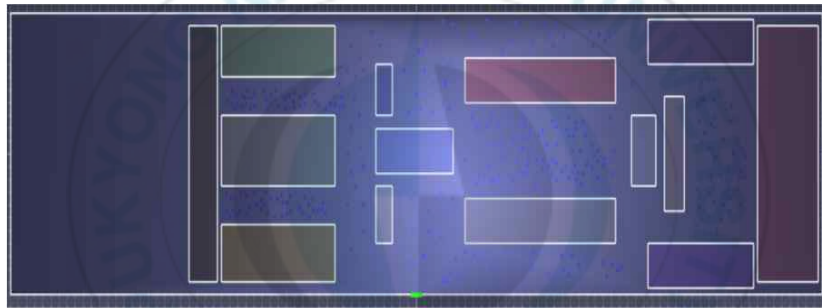


Fig. 4-26 Drawing of scenario 5.

Table 4-14 Evacuation time for accommodation evacuation scenario

출구 폭(m)	통과 시간(s)
1.0	273.5
1.5	167.5
2.0	125.3
2.5	101.0

## 5. 소결론

### 가. 거주구역 높이

본 논문에서는 거주구역 높이가 생존을 향상에 미치는 영향에 대해 확인하였다. 거주구역 높이를 2.0m에서 2.3m로 30cm 더 높일 경우의 온도 및 가시거리를 측정하였다.

온도의 경우 화재구역에서 10m 떨어진 지점에서 높이를 30cm 상향할 경우 대피허용 한계값에 도달하는 시간이 55.8초가 더 소요되어 136.8% 향상되었다.

가시거리는 화재구역에서 10m 떨어진 지점은 27.1초, 20m 지점에서는 109.2초나 증가함을 확인하였다. 30m 지점에서는 매연농도가 낮아져 73.3초만 증가하였다. 특히, 화원에서 20m 떨어진 지점에서는 유효피난시간이 118.2% 증가하는 것으로 확인되었다.

## 나. 복도 및 피난구 폭

일반적으로 매연에 의해 가시거리가 제한되면 피난이 쉽지 않다. 본 논문에서는 이러한 피난 장애요소 개선을 위해 기존 선박구조의 개선 즉, 복도 폭, 피난구의 폭 증가 시 유효피난시간 증가에 대해 검토하였다.

그 결과 복도 폭을 1m에서 1.5m로 확장할 경우 균중밀도가 0.5 일때 필요피난시간은 17.8초가 감소되었다. 그리고 피난구 폭을 1m에서 1.5m로 확장할 경우 균중밀도가 0.3일 때 6초의 필요피난시간이 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 대피로의 폭이 50cm 늘어날 경우 복도 폭은 균중밀도 0.5 이상, 피난구 폭은 균중밀도 0.3 이상일 때 필요피난시간은 대폭 줄일 수 있음을 확인하였다.

## 다. 제연경계벽

온도 및 연기는 위에서부터 아래로 내려오는 특성을 고려하여 천장에 제연경계벽을 20cm, 30cm, 40cm로 설치하는 방안을 제시하고 이를 실제 선박의 환경에 적용하여 온도 상승 및 가시거리를 측정하였다.

그 결과, 온도 감소율은 제연경계벽의 길이가 20cm일 경우는 차이가 없었다. 그러나 30cm일 경우는 제연경계벽이 없는 경우에 비해 2.2℃가 감소하여 온도 감소율이 6.6% 향상되었다. 또한, 40cm일 경우는 6.3℃가 감소하여 18.9%가 향상되었다.

가시거리 향상율은 제연경계벽의 길이가 30cm 이상인 경우는 FDS의 최대 측정 거리인 30m를 유지하였다. 가시거리 측정 결과 제연경계벽의 길이가 20cm인 경우에는 제연경계벽이 없는 경우에 비해 7.7m 증가하여 가시거리가 57%가 향상되었다. 특히, 30cm 이상일 경우는 연기로 인한 가시거리의 감소가 없는 것으로 나타났다.



## 제 V 장 결 론

본 논문에서는 선박 구조 개선이 인명 안전에 미치는 영향을 분석하기 위하여 관련 규정을 검토하고 화재시물레이션과 피난시물레이션을 수행하였다. 화재시물레이션에는 FDS, 피난시물레이션에는 Pathfinder를 사용하였다. 먼저 해적에 의한 선박 피랍 시 선원들의 생명을 보호하는 선원대피처에 대하여 인명 안전의 관점에서 규모를 제시하였다. 선박의 거주구역 높이, 복도 및 피난구 폭의 증대를 통해 필요피난시간 감소율을 분석하였다. 제연경계벽이 유효피난시간 증가에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 선박설비기준에 선원대피처의 바닥면적과 높이에 대한 기준이 없다. 이에 인명 안전의 관점에서 적정규모에 대한 기준 개정이 요구된다.
- (2) 선원대피처의 바닥면적과 높이를 분석한 결과, 1인당 바닥면적  $6.25 m^2$  이상, 높이 3m 이상일 때 1MW 이하의 화재 시 유효피난시간에 도달하는 시간이 필요피난시간 17.1초보다 컸다. 따라서 선원들이 안전하게 대피할 수 있음이 확인되었다.
- (3) 거주구역의 높이를 2m에서 2.3m로 30cm 더 높일 경우 화원에서 10m 떨어진 지점에서 온도를 측정한 결과 유효피난시간에 도달하는 시간은 2.0m일 경우 40.8초, 2.3m일 경우 96.6초로 136.8% 향상되었다.

- (4) 가시거리의 경우 화재구역에서 20m 떨어진 지점에서 유효피난시간에 도달하는 시간은 2.0m일 경우 92.4초이며 2.3m일 경우에는 201.6초로 118.2% 증가하였다. 그러므로 선박 거주구역의 높이를 30cm 높일 경우 유효피난시간이 대폭 증가됨을 확인할 수 있었다.
- (5) 군중밀도가  $0.5\text{명}/\text{m}^2$  이상일 때 복도 폭을 50cm 증가할 경우 필요피난시간이 감소하는 것으로 나타났다. 또 피난구의 경우 군중밀도가  $0.3\text{명}/\text{m}^2$  이상일 때 폭이 50cm 증가하면 필요피난시간이 크게 감소하였다.
- (6) 기존 선박의 복도 천장에 제연경계벽을 설치할 경우, 온도는 제연경계벽의 길이가 30cm이면  $31.1^\circ\text{C}$ 로 6.6%, 40cm이면  $27.0^\circ\text{C}$ 로 18.9%가 감소하였다. 가시거리는 제연경계벽이 없는 경우, 13.5m에 비해 제연경계벽의 길이가 20cm인 경우는 21.2m로 57%가 증가하였고 30cm 이상일 경우 연기에 의한 가시거리 감소는 없는 것으로 나타났다. 따라서 길이 30cm 이상의 제연경계벽이 인명 안전에 효과가 크므로 선박의 복도에 제연경계벽 설치가 필요함을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- 1) ICC International Maritime Bureau, 2013, Piracy and Armed Robbery Against Ships, <http://www.icc-ccs.org/>.
- 2) 국토해양부, 2012, 해적예방을 위한 해운업계 역량강화 및 국제협력 제고 방안에 대한 연구. pp.24-139.
- 3) 국가법령정보센터, 2015, <http://www.law.go.kr>.
- 4) 한국해양수산연수원, 2011, 해적대응세미나 - 삼호 주얼리호 해적사건을 중심으로 소말리아 해적수사를 통해 본 선장의 역할-.
- 5) 한국선급, 2011, KR Technical Information(The Requirements for Citadel's Facilities, no 2011-low-01).
- 6) 해양수산부 해양안전심판원, 2014, 해양사고통계, <https://www.kmst.go.kr/>
- 7) 한국선급, 해양수산부, 2006, SOLAS, 해인출판사, pp.359-661.
- 8) 전계룡, 2006, 해군 함정 화재 위험 개선을 위한 정량적 위험도 분석에 관한 연구, 석사학위논문, 국방대학교 국방관리대학원.
- 9) 이정훈, 1999, 선박의 화재 안전도 평가에 관한 연구, 석사학위논문, 서울대학교 대학원.
- 10) NIST, 2014, Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Manual, <http://fire.nist.gov/fds/>.
- 11) SFPE, 2005, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, pp.(3-367)-(3-371).
- 12) 일본건설성, 2000, 건설성 공시 제1441호.
- 13) Thunderhead engineering, 2009, User Manual, <http://www.thunderheadeng.com/>.
- 14) 국가법령정보센터, 2014, 소방시설 등의 성능위주설계 방법 및 기준, <http://www.law.go.kr>.

- 15) NFPA, 2009, NFPA 101 Life Safety Code, <http://www.nfpa.org>.
- 16) 한국선급, 해양수산부, 2006, The International Code for Fire Safety Systems(FSS code), 해인출판사, pp.9-138.
- 17) 해양수산부, 2014, 2013년 해적사고 발생동향.
- 18) 소방방재청, 2008, 국가 인명 안전기준 개발(최종보고서), p.13.
- 19) 한국건설기술연구원, 2000, 건축물 화재안전시스템 구축 -건축물 화재안전규정 개선 연구-, p.198.
- 20) 김홍태, 2004, 선박의 경사 및 동요효과가 탈출승객의 이동성에 미치는 영향, 대한산업공학회, 제17권, 제1호, pp.22-23.
- 21) 황재호, 김영수, 전용한, 조성철, 2012, 화재피난시물레이션, 동화기술, pp.10-20, pp. 119-125.
- 22) Kevin B. McGrattan and Anthony Hamins, 2001, Numerical Simulation of the Howard Street Tunnel Fire, NISTIR 6092.
- 23) Kevin B. McGrattan, 2005, Experiments and Modeling of Multiple Workstations Burning in a Compartment, NIST NCSTARI-5E.
- 24) Ronald G. Rehm, William M. Pitts, Howard R. Baum, David D. Evans, Kuldeep Prasad, Kevin B. McGrattan and Glenn P. Forney, 2002, Initial Model for Fires in the World Trade Center, NISTIR 6879.