Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 39, No. 3 pp. 312~317, 2015
J. Korean Soc. of Marine Engineering (JKOSME)
http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2015.39.3.312

ISSN 2234-7925 (Print)
ISSN 2234-8352 (Online)
Original Paper

FDS 분석을 통한 승객 및 선원 생존율 향상에 대한 연구

김원욱[1] · 김종수[2] · 박외철†

(Received January 5, 2015 ; Revised February 16, 2015 ; Accepted February 25, 2015)

A Study on the Improvement of Survival Rate of the Passengers and Crews according to FDS Analysis

Won Ouk Kim[1] · Jong Su Kim[2] · Woe Chul Park†

요약: 선박은 충돌, 좌초 및 화재 등의 여러 가지 원인으로 승객 및 선원들이 긴급 피난을 해야 하는 경우가 많이 발생한다. 일반적으로 모든 피난에서 생존율을 높이기 위해서는 피난 시간의 단축이 아주 중요한 요소이나 선박의 복잡하고 좁은 구조적 특성은 신속한 피난에 장애 요소가 되고 있다. 특히, 선박은 그 구조상 동일한 규모의 화재 발생 시 타 화재에 비해 확산속도가 빨라 신속한 피난이 필요하다. 또한, 선박은 해상에서 운항하는 특성으로 좋지 않은 해상 상태에서는 승객 및 선원이 행동적 제약이 발생한다. 이 연구에서는 인명 안전 차원에서 선박 구조 변경이 승객 및 선원의 생존율 향상에 미치는 영향에 대해 이론적 접근 및 수치 시뮬레이션을 통해 분석하고자 한다. 분석 도구로는 3차원 화재 분석 전용 프로그램인 FDS(Fire Dynamic Simulator)를 이용하였으며 화재 시 인명 안전에 영향을 가장 큰 영향을 미치는 온도 상승 및 가시거리 감소를 분석하였다. 그 결과 선박의 복도 폭 및 천장의 높이만 개선하여도 인명 안전에 상당한 도움이 되는 것으로 분석되었다.

주제어: 긴급 피난, 생존율, 인명 안전, FDS, 가시거리

Abstract: Seafarers can confront to evacuate from the ship with many reasons such as collision, grounding and fire accident. It believes that evacuation time from ship is very important element in order to increase survival rate in the contingency circumstance, however narrow and complex structure of ship is one of obstacle element against prompt evacuation. Taking into consideration the unique structure of ship compared to the structure of other facilities, speed of fire propagation on board ship is faster than the same size of other type facilities. Therefore, measures to prompt evacuation are required.

But it comes with the behavioral constraints of the crews and passengers of the nature of operating in a complex structure with narrow vessels. Therefore, in this study, we propose a formula to be analyzed by theoretical approach and simulation methods to improve the survival rate for the crew and passenger of the ship through the ship's structural modification. We analyzed the temperature rise and visibility which are the most influential effects on the life safety in the event of fire by using a three-dimensional analysis of sight-only program Fire Dynamic Simulator (FDS) as analytical tools.

Keywords: Emergency evacuation, Survival rate, Safety of life, Fire dynamic simulator, Visibility

Acronyms

FDS	화재분석시뮬레이터
Field Model	3차원 화재분석모델
SOLAS	국제해상인명안전협약
FSS Code	국제화재안전장치 코드
CFD	전산유체역학
FPA	화재 시 온도와 연기층 높이 분석법
LES	난류 화염 수치 계산법
DNS	직접 수치 모사

Nomenclature

P	통과인원
T_p	한 군중의 사람들이 비상구 통로상의 특정 지점을 통과하는데 걸리는 시간[sec]
k	피난 속도 상수 (복도, 비상구는 1.4 적용)
D	군중 밀도 [인원수(명)/유효면적[m2]]
W_e	출구 폭 [m]
u	속도
f	단위체적당 걸리는 외력
ρ	밀도
p	압력

† Corresponding Author (ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5289-9893): Department of fire protection engineering, Pukyoung National University, Youngso-ro, Nam-GU, Busan, 608-737, Korea, E-mail: wcpark@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6467
1 Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, E-mail: kwo0228@naver.com, Tel: 051-620-5816
2 Division of Marine System Engineering, Korea Maritime University, E-mail: jongskim@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4367

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.

Copyright ⓒ The Korean Society of Marine Engineering

v	점성계수
∇	연산자
$\triangle T_g$	고온 기체층 온도상승 (Tg-Ta) [K]
T_a	주위온도 [K]
$\dot{Q}$	화재의 열방출율 [kW]
$\dot{m}$	강제 환기 유량 [kg/s]
C_p	비열 [kJ/kg K]
h_k	열전달 계수 [kW/m^2]
A_T	공간내의 총 면적 [m^2]
E_{imp}	피난 불가능
E_p	피난 가능

1. 서 론

선박에 의한 해양사고에는 충돌, 접촉, 좌초 및 화재 등이 있다. 이러한 경우 안전을 담보 할 수 없을 때 최종적으로는 피난을 감행하여야 한다. 선박은 24시간 해상에서 운항하는 특성 때문에 피난을 감행한다 하더라도 해상이라는 2차적 위험에 봉착한다. 그리고 선박은 복잡하고 좁은 미로 같은 구조로 인해 피난이 쉽지 않다. 특히, 여객선의 경우 선박의 구조를 잘 이해 못하는 불특정 다수의 사람들이 승선을 하게 되어 더욱 더 어려운 상황이 된다. 세월호 참사에서 보는바와 같이 선박에 처음 승선하는 학생들에게는 특수한 내부 구조로 인해 피난이 쉽지 않았을 것이다.

이러한 이유로 선원들은 잘 훈련되어야 하며 승객들의 안전을 위해 효과적인 피난유도가 반드시 필요하다. 이 연구에서는 간단한 선박의 구조 개선(복도 폭 및 천장 높이 변화)을 통하여 선박의 가 인명 안전 측면에서 어떠한 영향을 미치는지에 대해 검토하고자 한다.

2. 연구방법

화재 시 선원의 생존율을 분석하기 위해서는 거주 공간내의 온도 및 피난에 필요한 가시거리 검토가 필요하다. 이를 분석하기 위해서 이 연구에서는 상·하층부의 온도 및 연기 하강시간을 고려한 3 차원 공간에서의 정밀하고 세분화된 해석이 가능한 Field Model방식을 사용하였다. 이 연구에서는 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발하여 전 세계적으로 가장 많이 사용되고 있는 FDS(Fire Dynamics Simulator)를 이용하였다. 이 연구를 위해서는 화재구역 도면을 .dxf 파일로 제작하여 FDS에서 요구하는 데이터 포맷으로 변환 한 후 FDS를 이용하여 연구를 수행하였다. 적용 방법은 **Figure 1**과 같다**[1]**.

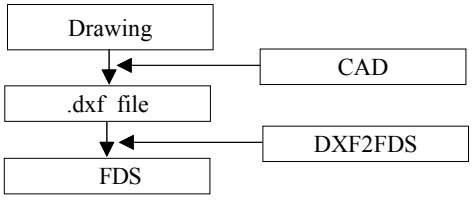

Figure 1: A flow diagram

시뮬레이션 환경 설정은 **Table 1**과 같다. 복도의 폭은 선박의 경우 SOLAS FSS Code 제 13장의 “탈출수단 배치”에 여객선과 화물선을 구분하여 규정하고 있다**[2]**. 이 중 화물선에 대해서는 계단과 복도에 대하여 “실제 통과 폭이 70 cm 이상이어야 하며 계단으로 향하는 출입문은 그 계단의 크기와 같아야 한다”는 규정에 의해 0.7 [m]로 지정하였으며 여객선의 경우 0.9 [m]이상을 요구하고 있어 0.9 [m]로 지정하였다. 그리고 임의적으로 1.0 [m] 기준으로 0.5 [m]씩 증가하는 복도 폭으로 적용하여 분석하였다.

천장의 높이의 경우 선박에서 갖추어야하는 각종 설비를 규정하여 정리한 해양수산부고시 “선박설비기준 제7조”에 의하면 2004. 10.19일 이전은 거주공간의 높이는 1.8 [m] 이상 (원양항해 2.0 [m] 이상)으로 규정하고 있으며 이후 인간의 신체변화를 고려하여 거주환경을 개선하기 위해 2.0 [m] 이상으로 동일하게 적용하도록 개정 고시하였다. 외국의 경우 영국(Statutory Instrument 1508)은 1.98 [m] 이상, 일본의 선박설비기준 및 선박설비규정은 우리나라와 동일하며 ILO협약에서는 1.9 [m] 이상을 규정하고 있다. 이에 반해 공동주택(아파트)은 “주택건설기준등에관한규정” 제4조에 의하면 침실과 거실의 높이는 2.2 [m]이상으로 규정하고 있어 선박과 육상을 비교 검토함과 동시에 0.2 [m] 를 상향 조정하는 시나리오를 추가 적용하였다. 그리고 이 시나리오에 의한 측정 위치는 화재 발생 지점에서 10 [m] 간격으로 위치를 지정하였으며 실제 분석은 30 [m] 지점에서 실시하였다.

Table 1: Simulation area

Items	Contents [m]
Corridor Length	50
Corridor width	0.7 / 0.9 / 1.0 / 1.5 / 2.0
ceiling height	2.0 / 2.2 / 2.4

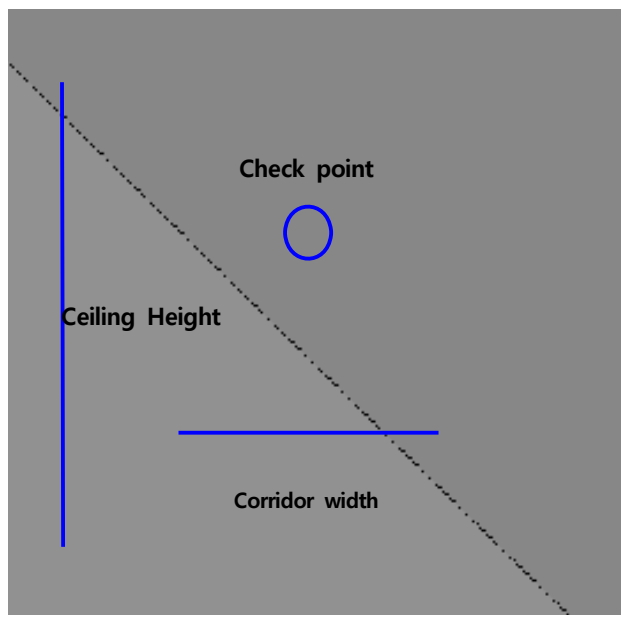

Figure 2: Simulation area

3. 이론에 의한 대피 허용시간 및 총 대피시간

대피 허용시간은 거실, 층, 복도로 나누어 설계지침을 정하고 있는데 이 연구에서는 2000년에 공시된 “일본 건설성(2000), 건설성 공시 제1441호(2000년 5월 31일)”의 복도 피난관련 수식인 $4\sqrt{A_{area}}$를 적용하였다**[3]**. 여기서 A_{area}는 공간의 가로와 세로의 곱을 말한다. 즉, 모든 승무원 및 승객이 이 시간 내에 대피를 감행해야 한다는 뜻이다. SFPE(Society of Fire Protection Engineers)의 Harold E. “Bud” Nelson과 Frederick W. Mowrer의 비상시 이동 연구의 피난 계산방법**[4]**에 의하면 군중밀도가 0.54명/m^2 이상일 경우 및 미만일 경우 피난 완료시간 계산방법은 **Equation (1)**과 **(2)**와 같다.

$$Tp = \frac{P(\text{통과인원})}{(1-0.266D)kDW_e} \quad (1)$$

$$Tp = \frac{P(\text{통과인원})}{(k-akD)\,W_e} \quad (2)$$

이 장에서 설명한 이론식에 의하면 **Table 2**와 같이 복도 폭에 따른 피난 허용시간이 분석된다.

Table 2: Permitted evacuation time

Corridor width[m]	Permitted evacuation time[sec]
0.7	18.3
0.9	20.8
1.0	21.9
1.5	26.8
2.0	31.0

Equation (1)과 **(2)**에 의해 이론식에 의한 피난 시간을 구하면 아래 **Table 3**과 같다. 단, 이 식들은 한 군중의 사람들이 비상구 통로상의 특정지점을 통과하는데 걸리는 시간으로서 피난 출구에 도착하는 시간은 감안하고 있지 않다. 사람의 평균 보행속도는 1 ~ 2 [m/s]로 알려져 있다. 총 20명의 인원이 30 [m] 지점의 출구에 도착하여야 하나 일부 인원은 출구 가까운 쪽에 있을 수도 있으므로 약 15 [sec]를 임의 지정하였다. **Table 3**에 의하면 인원이 10명인 경우 기존의 화물선의 복도 폭 기준인 0.7 [m]에서는 27.2 [sec], 여객선 기준인 0.9 [m]에서는 23.8 [sec]로 피난 허용시간인 18.3[sec]와 20.8초를 초과하여 안전하지 못한 것으로 분석되었다. 그러나 1.5 [m] 이상인 경우에서는 인원이 20 명인 경우에서도 25.8 [sec]로 피난 허용시간인 26.8 [sec] 이내로 안전한 것으로 나타났다. 특히, 2.0 [m]의 경우는 22.8 [sec]로 피난 허용시간인 31 [sec]보다 8.2 [sec]나 많았다. 즉, 인명 안전을 위해서는 복도의 폭을 증가 시키거나 선박 승무원의 적절한 피난 유도를 통해 인원들을 분산 피난시켜야 한다.

Table 3: Evacuation time

Persons (Number)	Corridor width [m]				
	0.7	**0.9**	**1.0**	**1.5**	**2.0**
10	27.2	23.8	22.8	20.2	18.7
11	E_{imp}	E_{imp}	E_{imp}	E_p	E_p
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20	43.7 sec	41.7 sec	41.0 sec	25.8 sec	22.8 sec

4. 화재 시뮬레이션

4.1 FDS의 개요

FDS는 화재로 발생하는 유체의 흐름을 계산하는 CFD모델로서 저속도의 열 흐름에 대한 Navier-Stokes 방정식의 한 형태를 수치 해석하는 필드모델로서 열과 연기의 흐름을 강조한 방정식을 계산하는 프로그램이다. 계산방법은 LES(Large Eddy Simulation) 또는 DNS(Direct Numerical Simulation)에 상관없이 보존방정식에 의해 예측된다. Navier-Stokes 방정식은 **Equation (3)**과 같다**[1]**.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = f_i - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \upsilon \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (3)$$

4.2 화재 시뮬레이션

FDS를 사용하여 시뮬레이션을 하기 위해서는 DXF 파일로 화재구역을 제작해야하므로 AutoCAD를 이용하여 DXF 파일로 변환 후 3차원 파일로 제작한다. 변환된 파일을 DXF2FDS 프로그램을 이용하여 FDS에서 원하는 파일로 변환한다. 이 시뮬레이션을 위한 물리적 조건은 아래와 같다. 화재 시 온도 및 가시거리 측정지점은 X축은 복도의 중간점인 0.6 [m], Y축은 피난완료 지점인 복도 끝단인 35 [m] 그리고 Z축은 사람의 거주 가능 시간을 측정하는 일적인 사람의 호흡위치인 1.5 [m]로 하였다.

○ 시뮬레이션 시간 100 [sec]
○ 화재강도 100 [kW]
○ 화원의 크기 50 [cm] × 50 [m]
○ 가연성 물질 목재
○ 실내온도 25 [°C]

승무원 및 승객이 안전하게 대피하기 위해서는 대피공간의 온도는 60 [℃] 를 초과하지 않아야 하며 가시거리로서는 출입문, 벽, 계단 등 스스로 발광하지 않는 반사체는 약 6 [m]에서 식별 가능한 조건을 만족하도록 규정하고 있다. 그리고 이 시뮬레이션에서는 대피한계 온도 및 가시거리를 파악한다. 대피공간의 온도는 60[℃] 를 초과하지 않아야 하며 가시거리로서는 출입문, 벽, 계단 등 스스로 발광하지 않는 반사체는 약 6 [m]에서 식별 가능한 조건을 만족하도록 규정하고 있다**[5]**.

온도 측정방법은 FPA방법을 사용하며 **Equation (4)**와 같다**[6]**.

$$\frac{\triangle T_g}{T_a} = 0.63\left(\frac{\dot{Q}}{\dot{m} C_p T_a}\right)^{0.72}\left(\frac{h_k A_T}{\dot{m} C_p}\right)^{-0.36} \quad (4)$$

4.3 화재시뮬레이션 분석

이 연구에서는 선박의 복도 폭과 천장에 높이가 인명 안전에 미치는 영향을 설명하기 위한 것으로서 시나리오는 **Table 4**와 같다.

Table 5에 의하면 기존 선박의 천장의 높이인 2.0 [m]일 경우 복도 폭이 0.7 [m]일 경우를 기준으로 최고온도의 경우 감소율이 최대 21.8 [%]로 개선되는 것으로 나타났으며 피난에 아주 중요한 요소인 가시거리는 무려 390 [%]나 개선되었다.

Table 4: Fire simulation scenario

Corridor width[m]	Ceiling Height[m]
0.7	2.0 / 2.2 / 2.4
0.9	
1.0	
1.5	
2.0	

Table 5: Max. temp. and min. vis. (ceiling height 2 [m])

Corridor width [m]	Max. Temp. [℃]	Temp. decrease improvement rate [%]	Min. Vis. [m]	Vis. increase improvement rate [%]
0.7	38.1	-	7.7	-
0.9	36.8	3.4	10.2	132.5
1.0	35.9	5.8	11.9	154.5
1.5	33.2	12.9	19.6	254.5
2.0	29.8	21.8	30.0	390.0

Table 6에 의하면 기존 선박의 천장의 높이 2.0 [m]보다 0.2 [m] 높은 2.2 [m]의 경우 복도 폭이 0.7 [m]일 경우를 기준으로 최고온도의 경우 감소율이 최대 18.2 [%]로 개선되는 것으로 나타났으며 피난에 아주 중요한 요소인 가시거리는 270.3 [%] 개선되었다.

Table 7에 의하면 기존 선박의 천장의 높이 2.4 [m]의 경우 복도 폭이 0.7 [m]일 경우를 기준으로 최고온도의 경우 감소율이 최대 14.1 [%]로 개선되는 것으로 나타났으며 피난에 아주 중요한 요소인 가시거리의 경우 163.9 [%] 개선되었다. 즉, 천장의 높이를 증가시키지 않은 경우도 복도 폭만을 증가 할 경우에도 인면 생존율을 상당히 높일 수 있을 것으로 판단된다.

Table 8에서 보는바와 같이 선박의 구조가 기존의 복도 폭인 0.7 [m] 그리고 천장의 높이가 2.0 [m]의 일 경우에 비해 높이를 0.4 [m]증가 시킬 경우 온도 증가 감소율이 16.3 [%]가 증가 하는 것으로 나타났다. 특히, 복도 폭을 2.0 [m]로 천장의 높이를 2.4 [m]로 증가시킬 경우에는 28.1 [%] 개선되었다.

Table 6: Max. temp. and min. vis. (ceiling height 2.2 [m])

Corridor width [m]	Max. Temp. [℃]	Temp. decrease improvement rate [%]	Min. Vis. [m]	Vis. increase improvement rate [%]
0.7	35.2	-	11.1	-
0.9	33.5	4.8	15.9	143.2
1.0	33.4	5.1	17.2	155.0
1.5	30.4	13.6	30.0	270.3
2.0	28.8	18.2	30.0	270.3

Table 7: Max. temp. and min. vis.(ceiling height 2.4 [m])

Corridor width [m]	Max. Temp. [℃]	Temp. decrease improvement rate [%]	Min. Vis. [m]	Vis. increase improvement rate [%]
0.7	31.9	-	18.3	-
0.9	31.1	2.5	25.0	136.6
1.0	30.5	4.4	28.9	157.9
1.5	29.1	8.8	30.0	163.9
2.0	27.4	14.1	30.0	163.9

Table 8: Analysis of max. temp. according to ceiling height

Corridor width [m] \ Ceiling Height [m]	2.0	2.2	2.4
0.7	38.1	35.2	31.9
0.9	36.1	33.5	31.1
1.0	35.9	33.4	30.5
1.5	33.2	30.4	29.1
2.0	29.8	28.8	27.4

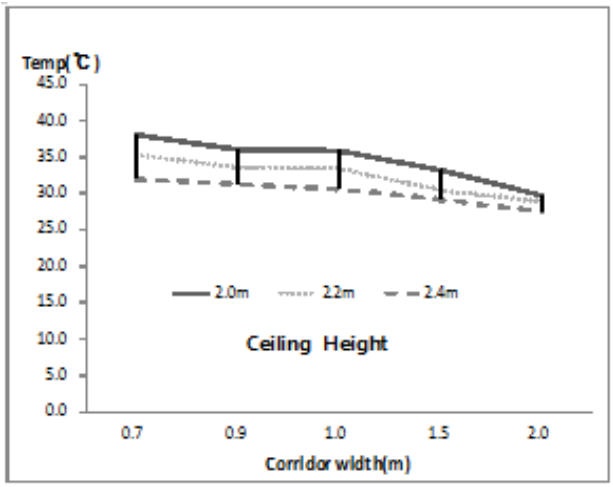

Figure 3: Analysis of max. temp. according to ceiling heigh

Table 9에서 보는 바와 같이 선박의 구조가 기존의 복도 폭인 0.7 [m] 그리고 천장의 높이가 2.0 [m]의 일 경우에 비해 높이를 0.4 [m] 증가 시킬 경우 피난에 아주 중요한 요소인 가시거리는 237.7 [%] 개선되었다. 특히, 복포 폭을 2.0 [m]로 천장의 높이를 2.4 [m]로 증가시킬 경우에는 389.6 [%] 개선되었다.

Table 9: Analysis of min. vis. according to ceiling height

Ceiling Height[m] / Corridor width[m]	2.0	2.2	2.4
0.7	7.7	11.1	18.3
0.9	10.2	15.9	25.0
1.0	11.9	17.2	28.9
1.5	19.6	30.0	30.0
2.0	30.0	30.0	30.0

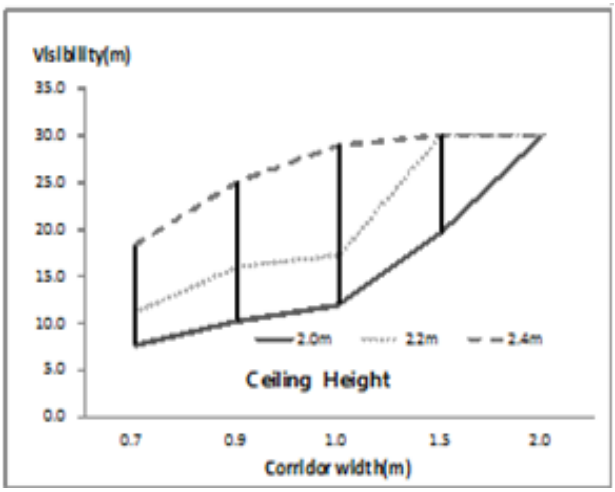

Figure 4: Analysis of Min. Vis. according to ceiling Height

Figure 5 and **6**은 복도의 폭과 천장의 높이에 대한 온도 분석 3D 시뮬레이션 결과이다. **Table 8**에서 분석된 결과를 3D로 표현한 것으로서 복도 폭 및 천장의 높이의 최소 값과 최대 값에 대한 결과이다.

Figure 7 and **8**은 복도의 폭과 천자의 높이에 대한 가시거리 분석 3D 시뮬레이션 결과이다. **Table 8**에서 분석된 결과를 3D로 표현한 것으로서 복도 폭 및 천장의 높이의 최소 값과 최대 값에 대한 결과이다.

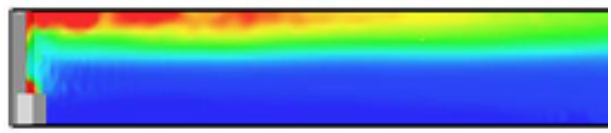

Figure 5: Analysis of Temperature (0.7 [m] /2.0 [m])

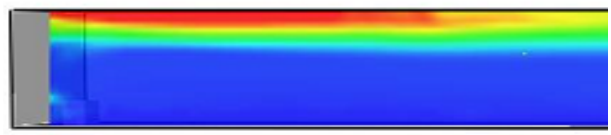

Figure 6: Analysis of Temperature (2.0 [m] / 2.4 [m])

Figure 7: Analysis of Visibility (0.7 [m] / 2.0 [m])

Figure 8: Analysis of visibility (2.0 [m] / 2.4 [m])

5. 결 론

현재 선박의 구조는 육상 건축물에 비해 좁은 출입구 및 복도 폭 그리고 낮은 천장을 구성되어 있다. 그러므로 동일한 크기의 화재 발생 시 승객 및 선원의 생존율이 낮아지게 된다. 이 연구에서는 기존의 선박 구조를 변경하여 이론적 접근 및 시뮬레이션을 이용한 수치 분석을 실시하였다. 그 결과, 온도의 상승 측면에서는 기존 규정인 복도 폭 0.7 [m], 천장 높이 2.0 [m]일 경우에 비해 천장 높이를 0.4 [m] 증가 시킬 경우 온도 증가 감소율이 16.3 [%]가 증가 하는 것으로 나타났다. 특히, 복도 폭을 2.0 [m]로 천장의 높이를 2.4 [m]로 증가시킬 경우에는 28.1 [%] 개선되었다. 또한, 긴급 피난에 아주 중요한 요소인 가시거리 확보 차원에서는 기존 규정인 복도 폭 0.7 [m], 천장의 높이가 2.0 [m] 일 경우에 비해 높이를 0.4 [m] 증가 시킬 경우 가시거리는 237.7 [%] 개선되었다. 특히, 복도 폭을 2.0 [m]로 천장의 높이를 2.4 [m]로 증가시킬 경우에는 389.6 [%] 개선되었다. 이 연구 결과 선박의 복도 폭 및 천장의 높이만 개선하여

도 인명 안전에 상당한 도움이 되는 것으로 판단된다.

References

[1] K. B. McGrattan, G. P. Forney, Fire Dynamics Simulator (Version 4) User's Guide, Technical Reference Guide. National Institute of Standards and Technology, NIST Special Publication 1018, 2004.

[2] Korea, MOF, SOLAS EDITION 2006-, HE-IN Publisher, pp 359-661, 2006.

[3] Ministry of Land Infrastructure, Notification No. 1441 of the Ministry of Construction, 2000.

[4] Korean Fire Protection Association, The SFPE handbook of Fire Protection Engineering, 2005 (in Korean).

[5] D. H. Rie and J. O. Lew, “A study of heat and smoke evacuation characteristics by the changing of operational method of tunnel fan shaft ventilation system for fire on subway train vehicle,” Fire Science and Engineering, vol. 17, no. 2, pp. 62-69, 2003.

[6] C. J. Lee, J. S Park, and N. C. Cho, Development of Performance based Fire Hazard Analysis Method and Evaluation System (Evaluation of Fire Modeling), Technical Analysis Reports, Korea Institute Of Nuclear Safety, Korea, 2008.