



FDS를 이용한 실습선 한바다호 화재 및 피난 연구

김 원 옥†
(한국해양수산연수원)

A Study on Fire and Evacuation of TrainingShip HANBADA using FDS

Won-Ouk KIM†
(Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology)

Abstract

Maritime accidents caused by a ship include collisions, sinking, stranding and fire etc. This study is intending to consider fire accidents among such diverse marine accidents. It is much likely that various sorts of fires break out because crews are living in a narrow space for long periods of time consequent on the ship's characteristic of sailing on the sea. This study carried out a simulation through the special program for fire analysis - FDS (Fire Dynamics Simulator) in order to find the effective evacuation time, i.e. life survival time. Particularly, this study did comparative analysis of the influence on the survival of cadets based on the collected simulation data by fire size and sort. As a result of the analysis, It was analyzed the Evacuation Allowable Limit Temperature 60°C and resulted that there is no influence in evacuation by temperature. In case of visibility analysis, it reached to 5m which is the Evacuation Allowable Limit at 117 seconds under the condition of wood fire in 1MW. When there is Kerosene in 1MW, it took 92.4 seconds to reach by 5m which is the Evacuation Allowable Limit. Theoretical evacuation time for the non-tilted ship was 118.8 seconds in 1MW sized fire so it is shown that the most passengers are met the evacuation safety in case of wood fire. However, the majority of passengers could not be ensured the evacuation safety in Kerosene case.

Key words : Maritime accident, Fire, FDS, Evacuation time, Temperature, Visibility

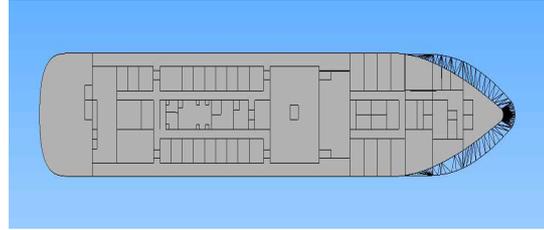
I. 서론

선박에 의한 해양사고는 충돌, 침몰, 좌초 및 화재 등 매우 다양하다. 선원들의 생명이 보장되지 못하면 최종적으로는 피난을 감행해야 한다. 선박은 24시간 해상에서 운항하는 특성 때문에 피난을 하더라도 해상이라는 2차적 위험에 봉착한다. 특히, 선박은 협소하고 복잡한 미로 같은 구조로 건조되어 있기 때문에 피난이 쉽지 않다. 이러한 이유로 선박에서는 소화 및 퇴선 훈련을 기본적으로 매월 1회 실시하고 있다(SOLAS,

1998). 해양안전심판원의 5년간(2010~2015) 해양 사고 통계에 의하면 총 9,533건의 사고 중 최고 높은 비율을 기관손상(3,044건)이었으며 충돌(1,288건), 침몰(227건), 좌초(652건), 화재(547건)로 나타났다(KMST, 2016). 이 중 인명 손상과 직접적인 관련이 있는 사고는 충돌, 화재, 침몰 등으로 볼 수 있는데 화재에 의한 비율이 높음을 알 수 있다. 하지만 선행연구로 선박화재에 대한 연구는 일부 있으나 선원 및 승객의 인명안전에 대한 피난 안전성을 연구한 것은 거의 없는 실정이다. 이러한 이유로 이 연구에서는 실제 운항

† Corresponding author : 051-620-5816, kwo0228@seaman.or.kr

중인 한국해양대학교 실습선 한바다호를 대상으로 선박 화재 시 피난 안전에 대한 연구를 수행하였다. 화재 분석은 FDS Version 5를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이 시뮬레이션 결과를 바탕으로 실습생들이 생존할 수 있는 시간인 대피허용한계값을 이론식에 의해 구하였다. 그리고 실습생들이 실제로 피난하는데 필요한 시간인 필요피난시간은 이론식에 의해 구하였다. 이렇게 구해진 데이터를 분석하여 실습생의 인명 안전성에 대해 고찰하였다.



[Fig. 1] Drawing of HANBADA

II. 피난 안전성 검토

이 장에서는 실제 피난에 소요되는 시간인 필요피난시간을 IMO MSC.1/Circ.1238의 피난지침식에 의하여 분석하였다. IMO 피난지침식은 $1.25(A+T)+2/3(E+L)$ 로 표현되는데 여기서 A는 피난반응시간(awareness time), T는 피난이동시간(travel time), E는 승정시간(embarkation time), L은 진수시간(launching time)을 나타낸다(Choi et al., 2010). 단, 구명정 진수시간과 승정시간을 제외한 실습생들이 퇴선훈련 시 승정위치에 집합하는 것에 대한 피난반응시간과 피난이동시간에 대해서만 검토한다. 대상선박은 한국해양대학교 실습선 한바다호로 [Fig. 1]에서 보는 바와 같이 상체는 <Table 1>과 같다. 그리고 거주구역의 높이는 2.6m 복도 및 피난구 폭은 1.3m이다.

<Table 1> Overview of the training ship HANBADA

L(m) × B(m) × D(m)	117.2 × 17.8 × 5.9
G/T(ton)	6,686
Speed(kts)	max. 19

승선인원은 실습 인원 에 의해 일부 변동이 있지만 100명을 대상으로 적용하였다.

피난반응시간의 이론식은 실습생들이 침실 및 강의실 등에 있다가 반응하는 것을 시나리오로 육상 건축물에 대한 일본 건설성(Kim et al., 2001)의 수식인 식(1)에 의해 계산하면 약 62.3초이다. 단, 유효면적은 전체면적의 1/2로 한다.

$$t_{start} = \frac{\sqrt{A_{floor}}}{30} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, t_{start} : 피난반응시간(min), A_{floor} : 층 면적 (단위 : m^2)이다. 그리고 실제 피난에 필요한 시간인 피난이동시간은 IMO MSC.1/Circ.1238에 규정된 수식인 미국의 SFPE(Society of Fire Protection Engineers)의 Harold E. "Bud" Nelson과 Frederick W. Mowrer의 비상 시 이동 연구의 피난계산방법에 의하여 계산하였다. 군중밀도가 $0.54/m^2$ 미만일 경우 피난 완료시간 계산방법은 식(2)와 같다(KFPA, 2005). 단, 도면을 파악하여 유효면적은 전체면적의 약 1/2로 산정하였다.

$$t_p = \frac{P(Through Personnel)}{(k - akD) W_e} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, t_p : 한 군중의 사람들이 비상구 통로상의 특정지점을 통과하는데 걸리는 시간(s), k : 피난 속도 상수 (복도, 비상구는 1.4 적용), a : 0.266 (상수), D : 군중밀도 [인원수(명)/유효면적(m^2)], W_e : 출구폭 (m)이다. a 는 피난속도 상수로 m/s인 경우 0.266를 적용한다. 이론식에 의한 피난이동시간은 약 56.5초로 검토되었다. 단, 선박의 경사 및 가시거리에 의한 보행속도 제한은 없는 것으로 계산하였으며 이때 피난구는 한 곳만 사용가

능한 것으로 하였다. 즉, 피난시간은 반응시간인 피난반응시간과 피난이동시간의 합이므로 총 피난에 사용된 시간은 118.8초로 예상된다. Galea의 연구에 의하면 경사각에 의한 보행속도는 heeling이 20도인 경우 23% 감소되는 것으로 나타났다 (Galea, 2016). 즉, heeling이 20도인 경우에 이론식은 146.1초로 계산된다.

Ⅲ. 화재 시뮬레이션

1. FDS의 개요

FDS는 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 수치 해석을 수행하는 CFD 프로그램으로 계산방법은 LES(Large Eddy Simulation) 또는 DNS(Direct Numerical Simulation)에 상관없이 보존방정식에 의해 예측되며 사용된 Navier-Stokes 방정식은 식 (3)과 같다.

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

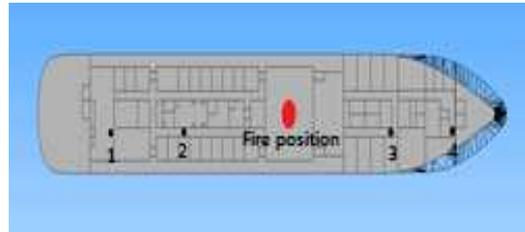
여기서, u : 속도, f : 단위체적당 걸리는 외력, ρ : 밀도, p : 압력, ν : 점성계수이다.

2. 화재 시뮬레이션

실습선 한바다호의 도면을 이용하여 FDS 전용 파일로 다시 제작하였다. 화재 시뮬레이션을 위한 물리적 조건은 아래와 같이 적용하였으며 화원의 경우 ISO 9705시험에서 최초 10분간은 100kW 그리고 1MW에서 플래쉬오버가 발생한다는 결과에 의해 화재의 크기는 100kW, 1MW로 지정하였다. 그리고 화원의 종류는 이 구역은 실습선이 생활하는 거주구역으로 주 화원으로 예상되는 목재와 선박화재에서 가장 많은 화원으로 분석되는 유류를 설정하였다. 자세한 내용은 아래와 같다.

- Fire Space(X, Y, Z Axis): 114m × 17m × 2.6m
- Simulation Time: 600 Seconds

- Fire Scale: 100kW, 1MW
- Size of Fire Source: 2 m × 2 m × 0.5m
- Flammable Material: Wood, Kerosene
- Interior Temperature: 25 °C



[Fig. 2] Simulation Area & measuring point

[Fig. 2]에서 보는 바와 같이 선박의 중앙 큰원이 화재 지점이며 온도 및 가시거리 측정지점은 작은 원으로 피난구로 이용될 복도를 기준점으로 하였다. 화재 지점 전후로 선박의 전장을 나타내는 x축에서 25m 간격으로 총 4개의 측정지점을 지정하였다. Y축은 선폭으로 복도 지점인 6m로 지정하였다. 그리고 Z축은 deck의 높이로 온도 및 가시거리 측정의 기준점인 사람의 호흡선 위치인 바닥에서 1.5m를 지정하였다. 단, 화원은 [Fig. 2] 에서 보는 바와 같이 중앙에 위치하기 때문에 우현과 좌현의 측정위치에서의 데이터는 거의 동일할 것으로 예상되어 이 중 우현만 지정하였으며 통풍은 차단된 것으로 가정한다. 온도 및 가시거리 측정은 FDS를 이용한 화재 시뮬레이션을 이용하여 대피허용한계값을 분석한다. 선박에만 적용되는 기준이 없기 때문에 육상에 적용되는 소방방재청고시 제2014-31호 소방시설 등의 성능위주설계 방법 및 기준의 별표(1)의 내용을 기준값으로 설정하였다(Rie D.H and Lew J.O 2003). 온도 측정방법은 FPA방법을 사용하며 식 (4)와 같다(KINS 2008).

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

여기서, ΔT_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/m²], A_T : 공간내의 총 면적 [m²]이다.

3. 화재 종류 및 크기별 결과 분석

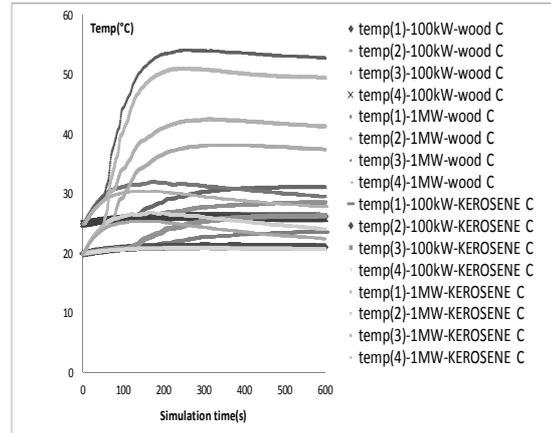
화재 발생 시 인명의 위협은 온도 및 연기에 의한 질식이다. 소방방재청고시 제2014-31호 소방시설 등의 성능위주설계방법 및 기준의 별표(1)에 의하면 생존 가능 온도는 60 °C 그리고 가시거리 5m 확보가 필요하며 이를 대피허용한계값이라고 한다. 이 절에서는 화재의 크기 및 종류에 따른 대피허용한계값을 분석하였다. [Fig. 2]에서 보는 바와 같이 총 4개의 측정점 중 대피허용한계값에 가장 먼저 도달하는 측정점(제3 측정지점)을 대상으로 온도에 대한 한계값인 60 °C에 대한 데이터를 분석한 결과는 <Table 2>에서 보는 바와 같이 이 연구의 대상인 화재의 크기 및 종류에 따라 모두 도달하지 않는 것으로 확인되었다. 즉, 온도에 의한 피난 제한은 없는 것으로 나타났다. [Fig. 3]은 전체 화재시나리오에 의한 온도 측정 결과이며 [Fig. 4]는 가시거리 분석 결과이다.

<Table 2> Time(s) to reach the temperature range of 60°C

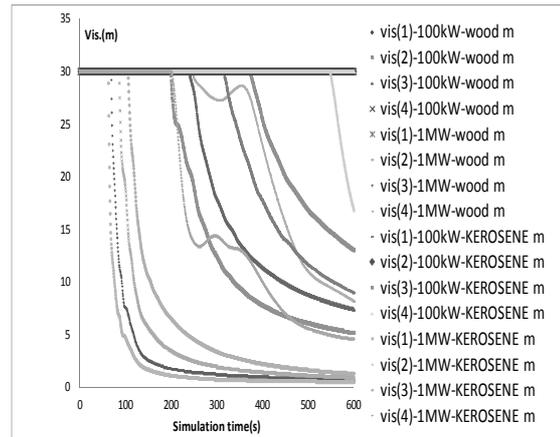
Type	100 kW	1 MW
Wood	-	-
Kerosene	-	-

그리고 화재의 종류 및 크기에 대한 가시거리를 분석한 결과는 <Table 3>과 같다. 제3 측정지점에 대하여 가시거리를 분석한 결과 목재 및 유류 화재 시 화원이 100kW에서는 대피허용한계값에 도달하지 못하였으나 1MW인 경우에는 목재

의 경우 117초, 유류의 경우 92.4초에 대피허용한계값 5m에 도달하였다.



[Fig. 3] Comparison of temperature variation with measuring point

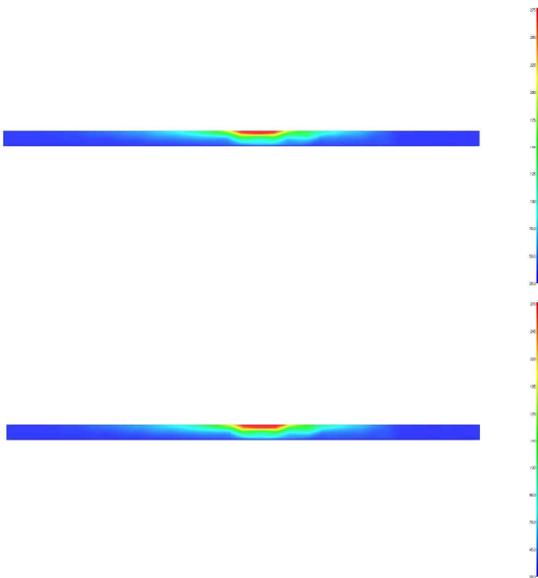


[Fig. 4] Comparison of visibility variation with measuring point

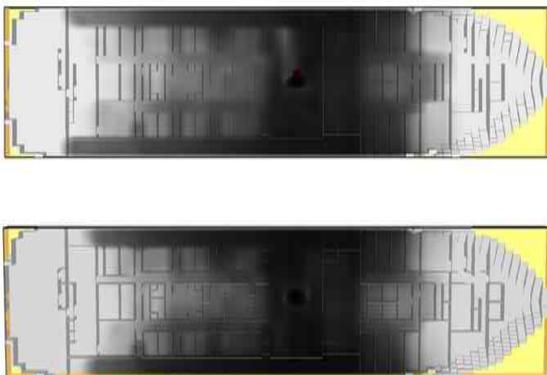
<Table 3> Time(s) to reach the visibility range of 5m (No. 1 Measuring point)

Type	100 kW	1 MW
Wood	-	117 (No. 3 Measuring point)
Kerosene	-	92.4 (No. 3 Measuring point)

[Fig. 5]와 [Fig. 6]은 화원이 1MW인 경우 목재 및 유류 화재 시 시뮬레이션 결과를 온도분포 및 가시도를 3차원 그림으로 보여준다. 목재의 경우 117초, 유류의 경우 92.4초에 대피허용한계값 5m에 도달하고 있는데 유류가 약 30초 빨리 도달하지만 온도분포([Fig. 5]) 및 가시도([Fig. 6])는 거의 유사함을 알 수 있다.



[Fig. 5] Comparison of Temp. variation with wood (117s) & kerosene(92.4s)



[Fig. 6] Comparison of visibility variation with wood (117s) & kerosene(92.4s)

IV. 결 론

현재, SOLAS에서 규정한 퇴선시간은 화물선 10분, 여객선 30분으로 규정하고 있다. 하지만 이 규정은 모든 승객 및 승무원이 구명정에 탑승하여 진수하는 총 시간을 말하는 것으로 피난시간만을 지칭하는 것은 아니다. 즉, 집합장소까지의 피난시간은 정하고 있지 않으나 운항자의 경험상 SOLAS에서 규정하는 퇴선시간의 최소 1/2이하는 되어야 할 것으로 보인다. 이 연구에서는 실제 한국해양대학교 실습선 한바다호를 대상으로 화재 발생을 인지하고 행동하는 피난반응시간과 실제 이동 시간인 필요피난시간을 구하여 다음과 같은 결과를 확인하였다.

1. 온도 대피허용한계값인 60 °C에 대한 데이터를 분석한 결과, 온도에 의한 피난 제한은 없는 것으로 나타났다.

2. 가시거리 대피허용한계값인 5m에 대한 데이터를 분석한 결과, 목재 화재 시 1MW인 경우는 117초에 대피허용한계값인 5m에 도달하였다. 유류 화재 시(Kerosene) 1MW인 경우는 92.4초에 대피허용한계값인 5m에 도달하였다.

3. 이론식에 의한 피난시간은 선박의 경사가 없는 경우 118.8초로 1MW의 화재의 크기에서 목재화재 시는 대부분의 인원이 피난 안전에 만족하지만 유류화재 시는 많은 인원의 실습생의 피난 안전이 보장되지 않는 것으로 확인되었다.

향후 선박 화재 시 승객 및 선원의 생존율에 관련한 대피허용한계값을 증가시키고 실제 피난 시간인 필요피난시간 감소를 위한 추가 연구가 필요하다. 즉, 선박의 방화, 소화설비 개선 그리고 선박 자체의 구조개선이 필요할 것이다.

References

Choi. J. · Kim, S. Y. · Shin. S. C. · Kang. H. J. & Park. B. J.(2010). “Development of an Evacuation Time Calculation Program for Passenger Ships

- Based on IMO Guidelines, MSC.1/Circ.1238”, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 47(5), 719~724.
- Galea(2016). "EXODUS/SMARTFIRE Software: engineering Safety, Security and Efficiency through Simulation“, EXDOUS International Seminar on Evacuation Solutions, 29.
- Kim, M. K. · Kim. W. H. & Ichiro Hagiwara(2001). New Evaluation Method of Egress Safety in the Japanese Building Standard Law, Proceedings of 2014 KIFSE Annual Fall Conference, 198~203.
- Korea Institute Of Nuclear Safety(2008). Development of Performance based Fire Hazard Analysis Method and Evaluation System(Evaluation of Fire Modeling), 19~20.
- Korea Registry(1998). Ministry of Oceans and Fisheries, SOLAS-Consolidated ed. 1998-, Haein press, 749.
- Korea Registry(1998). Ministry of Oceans and Fisheries, SOLAS-Consolidated ed. 1998-, Haein press, 752~759.
- Korean Fire Protection Association(2005). The SFPE handbook of fire protection engineering, (3-367~371).
- Korean Maritime Safety Tribunal(2016). Investigation Report, <<http://kmst.go.kr/eng/report/investigationReportList.jsp>>
- Rie. D. H. and Lew. J. O.(2003). “A study of heat & 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, 17(2), 62~69.
- Sharp, G. · Galea, E. R. & Gwynne, S.(2003). Critical review on model of evacuation analysis, FSEG & Greenwich
-
- Received : 20 December, 2016
 - Revised : 10 February, 2017
 - Accepted : 16 February, 2017