

SEA-Pro와 FDS를 이용한 실습선 한나라호 비상탈출 분석

김 원 옥†

한국해양수산연수원(교수)

Analysis of Emergency Evacuation for Training ship HANNARA using SEA-Pro & FDS

Won-Ouk KIM†

Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Busan, Korea (professor)

Abstract

Maritime accidents caused by vessels are classified as below: collision, contact, grounding, stranding and fire. In case of accidents, the seafarers and passengers need to be evacuated from the vessel. In spite of that the vessel is too more complicated than other transportation or constructions to induce immediate escape. Especially people on a passenger ship or a ferry are not trained crews and they are not familiar with the inner architecture. Hence, we should analyze the Required Safe Escape Time, which is important to improve the survival rate in case of many types of maritime accidents. In this research, we used a Ship Evacuation Analysis Program to carry out a simulation for evacuation on a real ship "HANNARA". Additionally, we also should compare the Required Safe Escape Time with Available Safe Escape Time to analyze the survival rate of passengers and crews. We adopted the Fire Dynamic Simulator, which is developed by the National Institute of Standards and Technology. As a result, in the physical condition that we assumed, the Available Safe Escape Time, which is needed to be survived, is longer than the Required Safe Escape Time, which is needed to be evacuated. This result indicates that is possible to evacuate the vessel safely.

Key words : Fire, SEA-Pro, Required safe escape time, FDS, Available safe escape time

I. 서론

선박에 의한 해양사고에는 충돌, 접촉, 좌초 및 화재 등이 있다. 이러한 사고가 발생할 경우 선원 및 승객들은 피난을 감행해야 한다. 하지만, 선박은 다른 거주 공간 및 교통수단에 비해 구조가 상대적으로 협소하고 복잡하여 신속한 피난이 쉽지 않다. 특히, 여객선과 유도선 등에 승선한 불특정 다수의 승객은 비상상황에 잘 훈련된 선원이 아니며 내부 구조에도 친숙하지 못한 상황

으로 더욱 피난이 어렵다. 또한, 선박은 해상에서 운항하는 특성 때문에 선박 동요가 발생하며 이로 인한 경사로 신속한 피난이 쉽지 않고 위험구역에서 피난을 완료해도 해상이라는 2차적 위험에 직면하게 된다. 이에 선박의 다양한 사고 상황에서 인명 생존율을 향상시키기 위해서는 실제 피난에 소요되는 시간인 필요피난시간과 생존 가능시간인 유효피난시간을 수치화하고 서로 비교 분석하여야 한다. 즉, 필요피난시간을 줄이고 유효피난시간을 증가시키는 방법에 대한 연구가 필

† Corresponding Author: 051-620-5816, kwo0228@naver.com

요하다. 이 연구에서는 한국해양대학교 실습선 한나라호(이하, 한나라호)를 대상으로 필요피난시간과 유효피난시간을 분석하여 인명 생존 가능성을 확인하고자 한다.

II. 연구 방법

실습선원 및 교직원의 생존 가능성을 분석하기 위해서는 위에서 설명한 바와 같이 필요피난시간과 유효피난시간을 비교분석하여야 한다. 이에 이 연구에서는 2019년 건조된 한나라호(전장 133m, 선폭 19.40m, 총톤수 9,196톤, 승무원원 승무원 39명/실습선원 200명)를 대상선박으로 설정하였다([Fig. 1]). 이때, 필요피난시간을 분석하기 위해 선박 피난분석 전용 프로그램인(Ship Evacuation and Analysis Program, 이하 SEA-Pro)을 이용하였다(Kim, 2016; Kim and Kim, 2016; Kim, 2017; Kim and Kim 2018; Kim and Kim 2019). 유효피난시간을 구하기 위해서는 미국 표준연구소(NIST: National Institute of Standards and Technology)에서 개발한 화재분석 프로그램(FDS: Fire Dynamic Simulator, 이하 FDS)를 이용하였다(NIST, 2014).

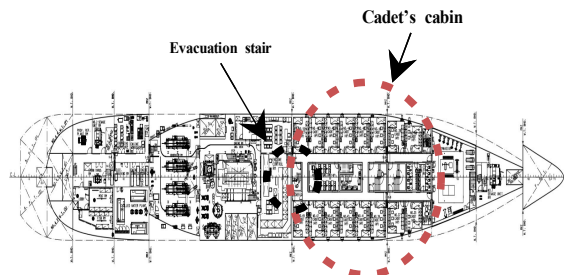


[Fig. 1] Trainingship HANNARA.
source: <http://www.naver.com>

1. 필요피난시간 분석방법

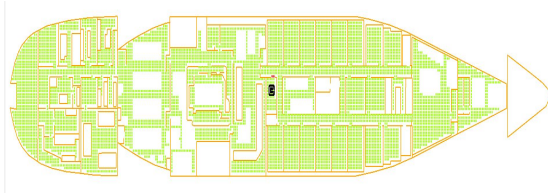
이 장에서는 실제 피난에 소요되는 시간인 필요피난시간을 IMO MSC.1/Circ.1238의 피난지침식

에 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). 이때, 피난반응시간은 화재알람 및 신고를 통해 인지하고 행동하는 단계를 말한다. 단, 구명정 진수시간과 승정시간을 제외한 실습선원들이 퇴선훈련 시 승정위치에 집합하는 것에 대한 피난반응시간과 피난이동시간에 대해서만 검토한다. 하지만 이 연구에서는 화재상황을 인식하고 반응하는 피난반응시간은 계산에 포함하지 않았다. 피난반응시간은 정확하게 확인할 수 없기 때문에 훈련받은 실습선원 및 교직원들은 즉시 반응하는 것으로 가정하여 피난반응시간을 감안하지 않았다. 피난분석은 결과 분석을 위해 피난상황은 사고 상황이 아닌 일반적인 상황과 화재상황으로 구분하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이 절에서는 다음 화재 시뮬레이션을 통한 유효피난시간과 SEA-Pro를 이용한 필요피난시간을 비교분석하여 인명 생존율을 구하기 위해 탈출시간을 구하고자 한다. 이때 사용된 공간은 [Fig. 2]에서 보는 바와 같이 실습선원들의 거주 공간인 2nd deck이며 탈출지점은 피난계단 입구로 한다. 실습선원은 거의 대부분 대학 3학년생이므로 연령대를 20대로 설정하였다. 그리고 실습선원들은 수업 종료 후 휴식 중일 경우로 가정하여 각자의 침실에 대기 중인 것으로 설정하였다.



[Fig. 2] Cadet's cabin and Evacuation stair.
source: HANNAR General Arrangement.

[Fig. 3]은 실제 도면인 [Fig. 2]를 이용하여 피난분석이 가능한 파일로 변환한 것이다.



[Fig. 3] SEA-Pro file.

2. 유효피난시간 분석방법

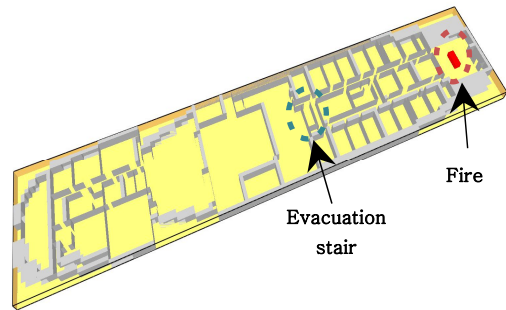
이 연구에서는 생존가능시간을 구하기 위해 화재시뮬레이션을 수행하였으며 이때 사용된 장치는 화재분석 전용 시뮬레이터인 FDS로 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 수치 해석을 수행하는 CFD 프로그램으로 열과 연기의 흐름에 특화되어 있다. 계산방법은 LES(Large Eddy Simulation) 또는 DNS(Direct Numerical Simulation)에 상관없이 보존방정식에 의해 예측된다. Navier-Stokes 방정식은 식(1)과 같다(McGrattan and Forney, 2004).

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

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

화재분석을 위해 실제 한나라호의 도면을 이용하여 AutoCAD로 3차원 모델을 제작하였다. FDS를 사용하여 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 DXF 파일로 화재구역을 제작해야 하므로 AutoCAD를 이용하여 DXF 파일로 변환한 후 변환된 파일을 DXF2FDS 프로그램을 이용하여 FDS 전용 파일로 다시 변환하였다. 화재 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 화재공간의 재질, 화재의 크기 및 화재장소 등과 같은 다양한 조건과 변수가 필요하다. 화재분석은 한나라호에 실습선

원들이 실제 거주하는 2nd Deck([Fig. 4])를 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. 화재 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 화재공간의 재질, 화재의 크기 및 화재장소 등과 같은 다양한 조건과 변수가 필요하다. 이 시뮬레이션을 위한 물리적 조건은 화재면적(133m × 19.4m × 2.1m), 시뮬레이션 시간(600s), 화원(1MW), 화원의 크기(4m × 1m), 가연성물질(wood, polyurethane), 내부온도(25 °C)이다. 화원의 경우 ISO 9705시험에서 최초 10분간은 100kW 그리고 1MW에서 플래쉬오버가 발생한다는 연구(Kim et. al.)에 의해 시뮬레이션 시간은 10분, 화재의 강도는 최댓값인 플래쉬 오버 상황을 고려하여 1MW로 설정하여 수행하였다. 이 연구에서는 다양한 구역과 화원이 존재하지만 거주구역 앞쪽에 위치한 체력단련실에서 주 화원으로 예상되는 목재와 선박용으로 많이 사용되는 폴리우레탄을 가연성 물질로 하였다.



[Fig. 4] Simulation area.

화재 시 온도 및 가시거리 측정지점은 실습선원들이 탈출을 감행하는 피난계단을 대상으로 하였으며 높이는 사람의 호흡선 위치인 바닥에서 1.5m를 지정하였다. 단, 공기조절장치와 방화문은 작동이 불가능한 것으로 가정한다. 이 연구에서는 FDS를 이용한 시뮬레이션에서 인명 생존율을 분석하기 위해 대피한계 온도 및 가시거리를 파악한다. 선박에만 적용되는 기준이 없기 때문에 육상에 적용되는 소방방재청고시 제2014-31호 소방시설 등의 성능위주설계 방법 및 기준의 별표(1)

의 내용을 기준값으로 설정하였다(Rie and Lew 2003). 온도 측정방법은 Foote, Pagni, Alvares가 공동으로 고안한 FPA방법을 사용하며 식(2)와 같다(KINS, 2008).

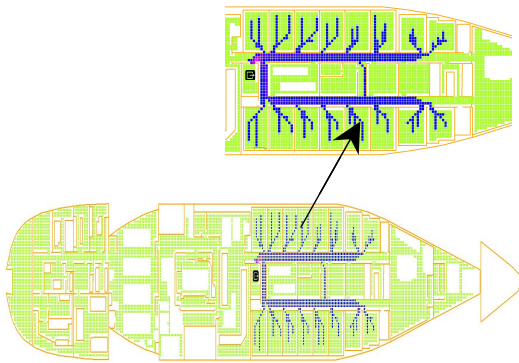
$$\frac{\Delta T_g}{T_a} = 0.63 \left(\frac{\dot{Q}}{m \cdot C_p T_a} \right)^{0.72} \left(\frac{h_k A_T}{m \cdot C_p} \right)^{-0.36} \dots (2)$$

여기서, ΔT_g : 고온 기체층 온도상승 ($T_g - T_a$) [K], T_a : 주위온도 [K], \dot{Q} : 화재의 열방출율 [kW], 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.

III. 결과 및 고찰

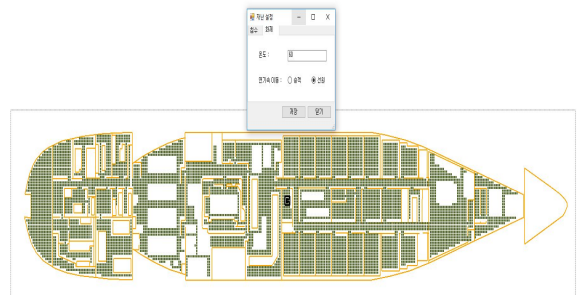
1. 필요피난시간 분석 결과

필요피난시간 분석을 위해 SEA-Pro를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며 [Fig. 5]는 이때 결과로 실습선원들의 이동경로를 표시한 것이다. 붉은색으로 표시되는 구간은 실습선원들이 집합하여 병목현상이 이루어지는 곳이다. 이는 피난 계획에 아주 중요한 요소로 효과적인 비상탈출 계획 수립을 통해 병목현상을 줄여주면 생존율은 상승하게 된다.

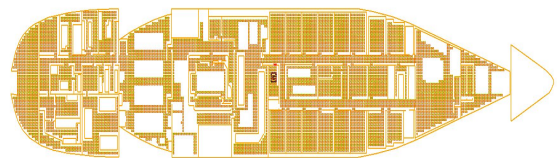


[Fig. 5] Evacuation route.

시뮬레이션 결과 마지막 인원이 피난계단을 통과하여 탈출하는데 걸리는 시간은 81.35초로 나타났다. [Fig. 6]은 재난조건에 화재 발생을 설정하는 것이며 [Fig. 7]은 이를 이용하여 보행속도 감소를 감안한 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 이때 실습선원은 선내 구조를 잘 파악하고 있어 승객이 아닌 선원으로 설정하였다.

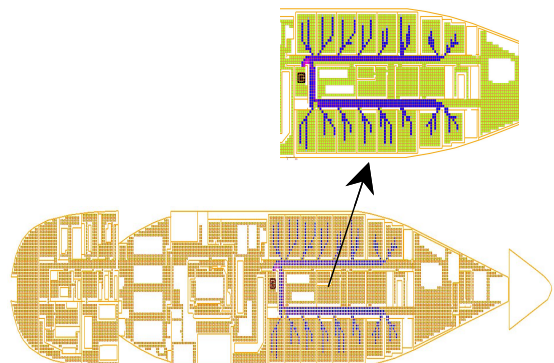


[Fig. 6] Arrangement of Fire Situation.



[Fig. 7] Fire simulation.

[Fig. 8]은 화재 상황에서 시뮬레이션을 수행한 결과로 실습선원들의 이동경로를 표시한 것이다.



[Fig. 8] Evacuation route in case of fire.

그 결과 마지막 인원이 피난계단을 통과하여 탈출하는데 걸리는 시간은 96.6초로 나타났다.

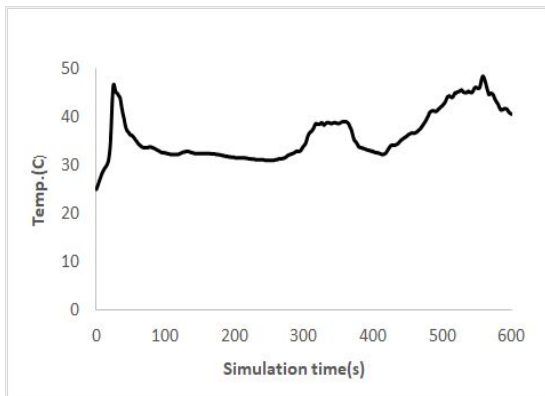
2. 유효피난시간 분석 결과

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(NLIC, 2014). 이 절에서는 화재의 크기와 대피허용한계값과의 관계를 분석하고자 한다.

목재를 가연성 물질로 한 온도 분석한 결과는 <Table 1>과 같다. 그 결과 온도는 화재 후 558초 경과 후 48.4°C를 최대로 성장하였다. 그 이후 온도는 감소하고 있다. 대피허용한계값인 60°C까지 성장하지 않았다.

<Table 1> Time to reach the temperature of 60 °C

Type	1 MW (sec)
Wood	Not reached

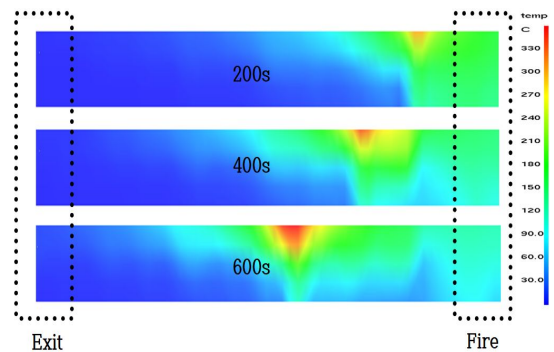


[Fig. 9] Variation of temperature (wood).

[Fig. 9]는 전체 온도 추이 그래프로 화재 초기에 약 50 °C를 최대로 서서히 감소하다가 약 400초에서 온도가 서서히 성장하여 550초에 다시 약

50 °C로 성장하고 다시 감소하는 추이를 보여주고 있다. 이 그래프는 일반적인 화재 발생 시 온도 변화와 거의 유사하게 나타났다(Son, 2004). 단, 대피허용한계값인 60°C까지 성장하지 않음을 알 수 있다.

[Fig. 10]은 목재를 화원으로 화재시물레이션을 수행하고 그 온도 추이를 가시화 한 것으로 화재 발생구역은 fire로 표시된 선수방향인 오른쪽 부분으로 시간이 지날수록 비상구 방향인 왼쪽으로 온도가 높아짐을 알 수 있다.



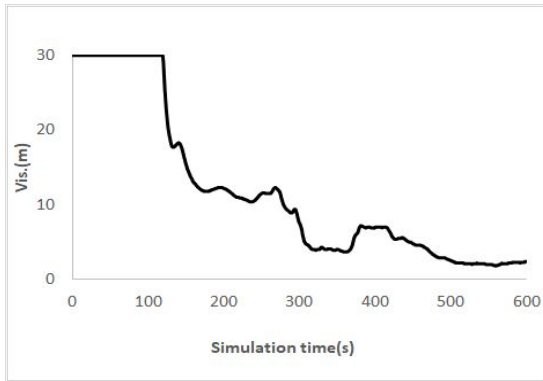
[Fig. 10] Temperature distribution / Emergency evacuation stair (wood).

<Table 2>는 가시거리를 분석한 결과로 307초에 대피허용한계값인 5m에 도달하였다.

<Table 2> Time to reach the Visibility of 5m

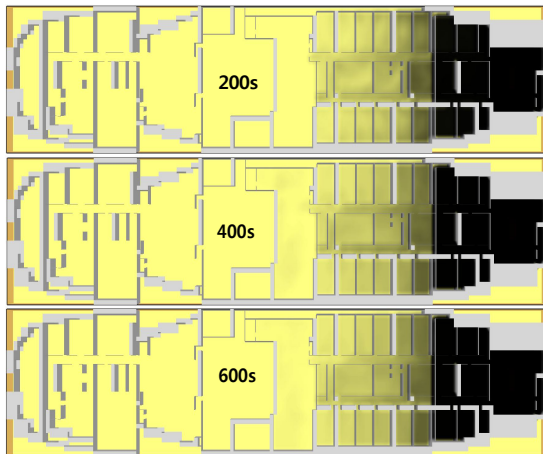
Type	1 MW (sec)
Wood	307

[Fig. 11]은 가시거리 추이에 대한 전체 그래프로 화재 발생 100초 후 가시거리가 급격하게 감소하다가 약 307초에 가시거리가 5m로 감소됨을 알 수 있었다. 단, 그래프에서 화재 발생 초기 약 100초 정도까지 가시거리가 30m로 일정한 이유는 fds 프로그램의 특성상 최대 거리를 30m로 설정하고 있기 때문이다.



[Fig. 11] Variation of Visibility (wood).

[Fig. 12]는 연기의 유동을 가시적으로 보여주는 것으로 300초 후에 5m로 가시거리가 감소한 이유로 거의 차이가 보이지 않는다.



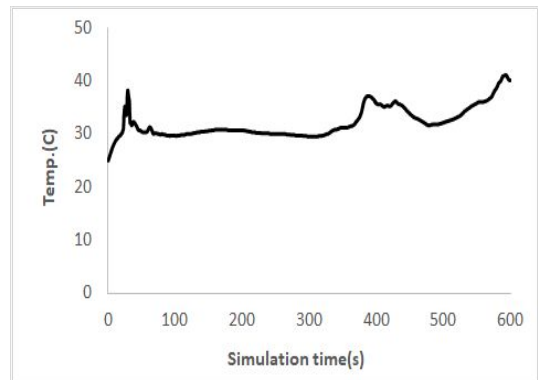
[Fig. 12] Visibility distribution (wood).

<Table 3>은 폴리우레탄을 가연성 물질로 온도를 분석한 결과로 대피허용한계값인 60℃까지 성장하지 않았다.

<Table 3> Time to reach the temperature of 60℃

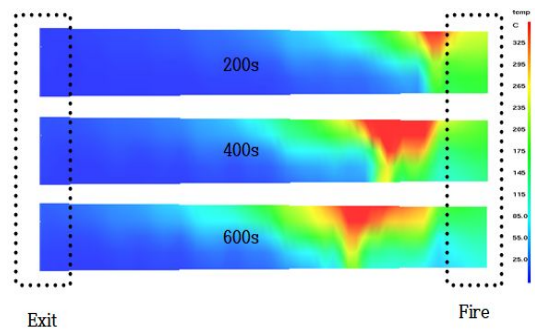
Type	1 MW (sec)
Polyurethane	Not reached

[Fig. 13]은 온도 추이에 대한 전체 그래프로 화재 초기, 약 400초, 600초에서 약 40로 최대 온도를 보였으나 거의 30℃로 일정하게 온도가 유지됨을 알 수 있었다.



[Fig. 13] Variation of temperature (Polyurethane).

[Fig. 14]는 폴리우레탄을 가연성 물질로 한 화재시뮬레이션 결과를 가시적으로 표현한 것으로 목재와 같이 화재 발생 구역은 fire로 표시된 선수 방향인 오른쪽 부분으로 시간이 지날수록 비상구 방향인 왼쪽으로 온도가 높아짐을 알 수 있다.



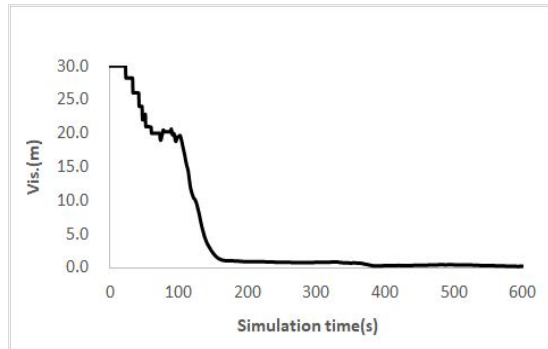
[Fig. 14] Graph of temperature / Emergency evacuation stair (Polyurethane).

<Table 4>는 폴리우레탄을 가연성 물질로 한 화재 시 가시거리를 분석한 결과로 136초에 대피허용한계값인 5m로 감소하였다.

<Table 4> Time to reach the Visibility of 5m

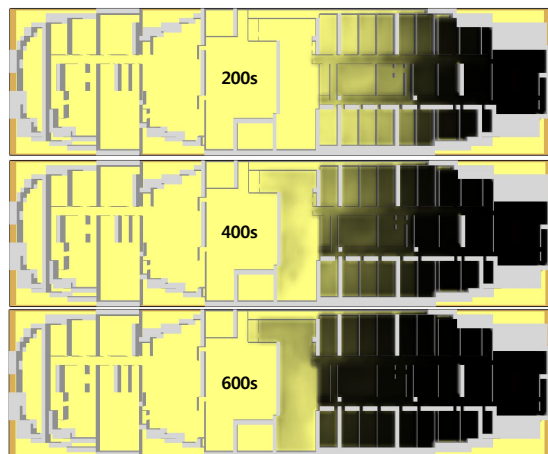
Type	1 MW (sec)
Polyurethane	136

[Fig. 15]는 화재 전체에 대한 가시거리 곡선으로 136.3초를 시작으로 계속해서 가시거리는 거의 확보가 되지 못하고 있음을 알 수 있었다.



[Fig. 15] Variation of Visibility (Polyurethane).

[Fig. 16]은 연기 유동 정도를 보여주는 것으로 시간이 증가할수록 가시거리가 감소됨을 알 수 있다.



[Fig. 16] Result of soot density simulation (Polyurethane).

목재 및 폴리우레탄을 가연성 물질로 한 화재

시뮬레이션 후 온도와 가시거리를 측정한 결과는 <Table 5>와 <Table 6>와 같다. 온도의 경우 두 가지 가연성 물질 모두에서 대피허용한계값인 60℃에 도달하지 못해 온도 상승으로 인한 인명의 손실은 없는 것으로 확인되었다.

<Table 5> Time to reach the temperature of 60℃

Fire source	1 MW (sec)
Wood	Not reached
Polyurethane	Not reached

그러나, 가시거리의 경우 대피허용한계값인 5m에 도달하는 시간은 가연성물질이 목재인 경우 307초, 폴리우레탄인 경우 136초로 확인 되었다. 특히, 폴리우레탄의 경우 그 물질의 성격상 유독성 가스의 분출이 높고 이로 인해 가시거리의 급격한 감소가 확인되었다.

<Table 6> Time to reach the Visibility of 5m

Fire source	1 MW (sec)
Wood	307
Polyurethane	136

이에 피난 및 화재시뮬레이션 결과를 종합적으로 판단한 결과는 <Table 7>과 같이 유효피난시간이 필요피난시간보다 길어 안전한 탈출이 가능한 것으로 확인되었다.

<Table 7> Comparison of Required Safe Egress Time and Available Safe Egress Time

	Fire source	
	wood	Polyurethane
Required Safe Escape Time (a)	96.6 sec	
Available Safe Escape Time (b)	307 sec	136 sec
a < b = safe	safe	safe
a > b = danger		

IV. 결 론

한나라호에 대한 피난시물레이션과 화재시물레이션을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) SEA-Pro를 이용하여 필요피난시간을 분석한 결과 사고 상황이 없는 일반적인 상황에서 마지막 인원이 피난계단을 통과하여 탈출하는데 걸리는 시간은 81.35초, 화재 상황의 경우는 마지막 인원이 피난계단을 통과하여 탈출하는데 걸리는 시간은 96.6초로 나타났다.

2) FDS를 이용하여 화재시물레이션을 수행하고 유효피난시간을 분석한 결과 온도 상승에 대한 문제점은 발생하지 않았지만 가시거리의 경우 목재화재 시는 307초, 폴리우레탄 화재 시는 136초로 나타났다.

3) 종합판단 결과, 이 연구에서 설정한 물리적 조건 하에 화재가 발생하는 경우는 생존가능시간인 유효피난시간이 피난에 소요되는 시간인 필요피난시간보다 길어 안전한 탈출이 가능한 것으로 확인되었다.

단, 필요피난시간은 화재상황을 인식하고 반응하는 피난반응시간과 실제 이동시간인 피난이동시간을 합한 것으로 피난반응시간은 계산에 포함하지 않았다. 이미 언급한 바와 같이 피난반응시간은 정확하게 확인 할 수 없기 때문에 훈련받은 교직원 및 실습선원들은 즉시 반응하는 것으로 가정하여 피난반응시간을 감안하지 않았다. 향후, 지속연구를 통해 인명 생존율을 높이기 위한 필요피난시간 감소, 유효피난시간 증가에 대한 연구가 필요할 것이다.

References

Choi J, Kim SY, Shin SC, Kang HJ and 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.
<https://doi.org/10.3744/SNAK.2010.47.5.719>
Galea(2016). EXODUS/SMARTFIRE Software: engineering Safety, Security and Efficiency through Simulation, EXDOUS International Seminar on Evacuation Solutions, 29.
Kim MK, Kim WH and Hagiwara I(2003). New Evaluation Method Safety in the Japanese Building Standard Law, Fire Science and Engineering 2001 Fall conference, 17(2), 62~69.
Kim UH, Dillon SE and Quintiere JG(1999). ISO 9705 Room-Corner Test & Model simulations, Korea Institute of Fire Science & Engineering, 13(2), 3~11.
Kim WO(2016). A Study on Evacuation Time According to Seafarer Visibility, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, 22(6), 600-606.
Kim WO and Kim DH(2016). A Study on Ship Evacuation Safety Consequent on the Size and Sort of Fire, The Journal of Fisheries and Marine Sciences Education, 28(5), 1358~1364.
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2016.28.5.1358>
Kim WO(2017). A Study on Fire and Evacuation of TrainingShip HANBADA using FDS, The Journal of Fisheries and Marine Sciences Education, 29(2), 380~385.
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2017.29.2.380>
Kim WO and Kim DH(2018). Development Ship Evacuation and Analysis Program(SEA-Pro), The Journal of Fisheries and Marine Sciences Education, 30(2), 422~432.
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2018.04.30.2.422>
Kim WO and Kim DH(2019). Improvement of SEA-Pro Reliability Through Comparison with the Real Ship's Abandon Ship Drill, The Journal of Fisheries and Marine Sciences Education, 31(2), 653~659.
Korea Institute Of Nuclear Safety(2008). Development of Performance based Fire Hazard Analysis Method and Evaluation System(Evaluation of Fire Modeling), 19~20.
Korean Fire Protection Association(2005). The SFPE handbook of fire protection engineering. (3-367)-(3-371).

- McGrattan KB and Forney GP, Fire dynamics simulator(Version 4) user's Guide, Technical reference guide. National Institute of Standards and Technology, NIST Special Publication 1018, 2004.
- NIST(2014). Fire Dynamics Simulator(Version 5) User's Manual, <http://fire.nist.gov/fds> on June 01.
- NLIC(2014). National Legal Information Center, Standard of ship equipment, <http://www.law.go.kr> on June 01.
- Rie DH and Lew JO (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.
- Satoh E, Yoshikawa T and Yamada A(2006). Investigation of converted walking distance considering resistance of topographical features and changes in physical strength by age, Journal of Architecture Planning, 610, 133~139.
- Son BS(2004). General consideration of firefighting science. DongHwa Technology publishing, PaJu, KOREA, 197.
-
- Received : 01 June, 2021
 - Revised : 29 June, 2021
 - Accepted : 05 July, 2021