

선박 화재시 제연경계벽 설치가 온도 감소 및 가시거리 향상에 미치는 연구

김원욱 · 홍정혁†

한국해양수산연수원(교수)

A Study on the Reduced temperature and Improvement of Visibility during Ship's fire of Draft Curtain

Won-Ouk KIM · Jeong-Hyuk HONG†

Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology(professor)

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. Since ships load assorted cargoes and operate at sea for a long time, the possibility of various types of fires is high. Accordingly, different equipment and facilities are installed on ships to increase the survival rate of passengers and crew. Among these facilities, in the residential area where passengers and crew live, fire doors are installed and operated to prevent the spread of fire. In other words, the fire door is automatically closed in case of a fire alarm to prevent the spread of fire. Fire doors are very effective not only in preventing the spread of fire itself, but also in preventing the spread of smoke, which accounts for most of the casualties. However, it can be fatal for passengers and crew members located inside the fire doors who have not yet completed their evacuation. In the event of a fire, the temperature and soot rise upward and move through the ceiling. In this study, since draft curtains are not installed on ships, the effect on the increase in effective evacuation time, which is the lifespan time, was analyzed. As a result, in the case of temperature, when the draft curtain is 30cm, compared to the case without the draft curtain, the temperature reduction rate is improved by 6.6% by decreasing 2.2°C. Also, when the draft curtain was 40cm, the temperature decreased by 6.3°C, which improved by 18.9%. In the case of visibility, when the draft curtain is 20cm, 57.0% is improved from 13.5m to 21.2m compared to the case without the draft curtain. In particular, when the draft curtain is 30cm or more, there is no decrease in the visible distance due to smoke.

Key words : Maritime accident, Fire, Fire door, Draft curtain, Available safe escape time

I. 서론

선박에 의한 해양사고에는 충돌, 접촉, 좌초 및 화재 등이 있다. 중앙해양안전심판원에 의하면 2016~2020년 5년간 총 13,687건의 해양사고가 발생하였으며 이 중 화재·폭발은 588건으로 전체의

4.3%를 차지하였다. 이때, 인명사고 현황을 살펴 보면 전체 사고 중 사망과 실종은 총 589명이며 이 중 화재·폭발은 33명, 부상의 경우는 총 1,900명 중 78명으로 확인되었다(KMST, 2021). 특히, 화재·폭발은 사고 비율이 4.3%인데 반해 사망과 같은 대형 인명사고는 5.6%로 타 사고에 비해 그

† Corresponding author : 051-620-5801, hongjh825@hanmail.net

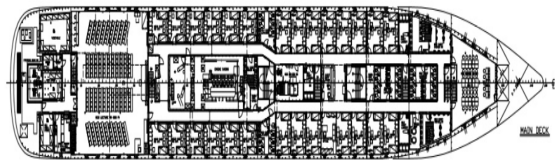
비율이 높은 것으로 나타났다. 이런 이유로 본 연구에서는 여러 종류의 해양사고 중 선박화재에 대해 고찰하고자 한다. 선박은 그 특성상 장시간 해상에서 승객 및 승무원들이 생활하면서 운항하기 때문에 다양한 종류의 화재 발생 가능성이 높다. 조사에 의하면 전체 선박 화재사고의 약 50%가 기관실에서 발생하며 이때 주 화원은 유류였다. 그리고 화물창과 거주구역의 순으로 발생하는 것으로 나타났다. 즉, A, B, C, D급의 모든 종류의 화재가 다양하게 발생하고 있다(Kim and Kim, 2016). 이에 선박에서는 화재 발생 시 소화를 위해 CO₂, Foam, Dry powder 등 휴대용소화기와 수소화장비, CO₂시스템, Water mist 등 고정식 소화설비 장치를 설치하고 있다. 또한, 소화 작업 실패를 고려하여 승객 및 승무원들의 대피허용한계시간을 증대시키기 위한 방화문이 설치되어 있으며 이 시설은 화재정보 발령 시 자동적으로 폐쇄되어 화재 확산을 막는다. 특히, 방화문은 화재 자체의 확산뿐만 아니라 사망의 대부분을 차지하는 연기의 확산을 방지하는데 큰 효과가 있다. 그러나 화재 발생 시 다양한 곳에서 업무를 보거나 휴식을 취하는 모든 인원들이 동시에 피난을 완료하지 못할 수 있어 미처 피난하지 못한 방화문 안쪽에 위치한 승객 및 승무원들에게는 치명적일 수 있다. 이런 이유로 육상의 경우 연기유동을 지연시키는 제연경계벽을 설치하고 있으며 자세한 내용은 “제연설비의 화재안전기준 제4조 제연설비(NFSC 501)”에 규정하고 있다. 또한, 지하공간, 터널 등에 제연경계벽에 관한 많은 연구(Kim et al., 2021; Baek and Lee, 2016; Kwark, 2006; Roh and Hur, 2004)가 수행되었지만 선박에는 제연경계벽 설치가 강제되지 않아 유사 연구가 거의 진행되지 않았다. 이와 같은 이유로 본 연구에서는 승객 및 승무원들이 거주하는 거주구역에 연기의 유동을 지체시켜 인명 생존율을 향상시키기 위하여 기존의 화재 확산을 막기 위해 설치된 방화문(NLIC, 2021)과 제연경계벽을 비교 분석하고자 한다.

II. 연구 방법

본 연구에서는 한국해양대학교 실습선인 한바다호를 대상선박으로 비교분석하였으며 주요 제원은 <Table 1>과 같고 일반배치도인 GA의 경우 지면상 학생들이 주로 생활하는 main deck만 제시한다(Fig. 1).

<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



[Fig. 1] Training ship HANBADA GA(Main deck).

이를 위해 실습생 및 승무원의 생존 가능성을 분석하기 위해 대피허용한계시간을 뜻하는 유효 피난시간(Available Safe Egress Time: ASET)을 구한다(Kim and Kim, 2018). 그리고 인명생존율을 확인하기 위해 방화문과 제연경계벽을 설치한 후 화재 시뮬레이션을 통해 유효피난시간과 온도와 연기의 유동값을 구해 비교분석한다. 이를 위해 미국 표준연구소(NIST: National Institute of Standards and Technology)에서 개발한 화재분석 프로그램(FDS: Fire Dynamic Simulator, 이하 FDS)를 이용한다(NIST, 2014).

1. FDS의 개요

FDS는 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 수치 해석을 수행하는 CFD 프로그램으로 열과 연기의

흐름을 잘 표현하고 분석하여 현장에서 많이 사용되어진다. Navier-Stokes 방정식은 식(1)과 같다 (McGrattan and Forney, 2004).

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

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

온도 및 가시거리 측정은 FDS를 이용하여 유효피난시간을 분석한다. 선박에만 적용되는 기준이 없기 때문에 육상에 적용되는 소방방재청고시 제2014-31호 소방시설 등의 성능위주설계 방법 및 기준의 별표(1)의 내용을 기준으로 설정하였다(Rie and Lew, 2003). 온도 측정방법은 FPA방법을 사용하며 식(2)와 같다(KINS 2008).

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

여기서, ΔT_g : 고온 기체층 온도상승 (Tg-Ta) [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.

2. 화재 시뮬레이션

실제 한바다호의 도면을 이용하여 3차원 모델(.dxf)을 제작하였다. FDS를 사용하여 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 DXF2FDS 프로그램을 이용하여 FDS 전용 파일로 다시 변환하였다. 화재 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 화재공간의 재질, 화재의 크기 및 화재장소 등과 같은 다양한 조건과 변수가 필요하다. 화재분석에 있어서 방화문 및 제연경계벽은 복도에 설치되기 때문에 한바다호에 실습생들이 탈출에 이용하는 복도를 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. 이때, 화재시

뮬레이션을 위한 복도 구조는 <Table 2>와 같다.

<Table 2> Parameters of Corridor structure

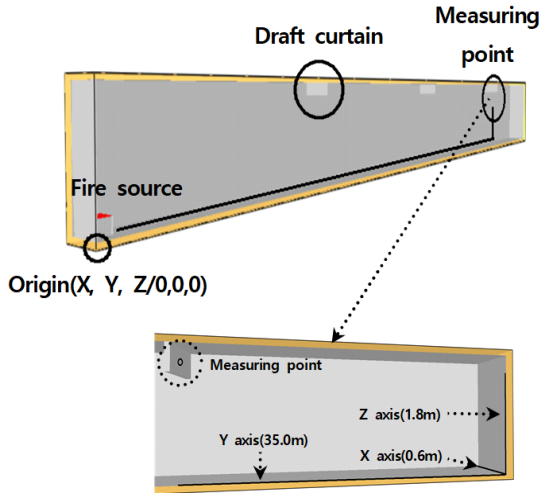
Content	parameters (m)
Length	36.85
Width	1.20
Height	2.42

화재 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 화재공간의 재질, 화재의 크기 및 화재장소 등과 같은 다양한 조건과 변수가 필요하다. 이 시뮬레이션을 위한 물리적 조건은 <Table 3>과 같이 거주구역에서 가장 많이 발생할 수 있는 목재를 화원으로 설정하였다.

<Table 3> Simulation parameters of Fire

Content	parameters
Simulation time	100 sec.
Fire scale	100kW
Size of Fire Source	60cm × 60cm
Flammable Material	wood
Interior Temperature	20 °C

온도 및 가시거리 측정점은 [Fig. 2]에서 보는 바와 같이 기준점으로부터 x축은 복도의 중간점인 0.6m, y축은 학생들의 피난 완료 지점인 복도 끝단 35m 그리고 z축은 일반적인 사람의 호흡 위치인 1.5 ~ 1.8m로 설정하나 본 연구에서는 안전을 고려한 1.8m로 하였다. 이때, 화재 시뮬레이션은 방화문이 열려 있는 상황과 제연경계벽의 길이가 각각 20cm, 30cm, 40cm일 경우로 다양하게 구분하여 수행하였으며 간격은 10m이다. 여기서 제연경계벽의 길이는 천정에서 내려오는 길이를 말한다.



[Fig. 2] Measuring point of temperature & visibility.

III. 결과 및 고찰

1. 제연경계벽 설치

본 연구에서 정한 물리적 환경 속에서 화재 시물레이션을 수행한 결과, <Table 4>에서 보는 바와 같이 모든 시물레이션에서 대피허용온도 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 향상되었으나 제연경계벽이 온도 상승률 제어에는 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 확인되었다.

<Table 4> Max. temperature according to Draft Curtain length

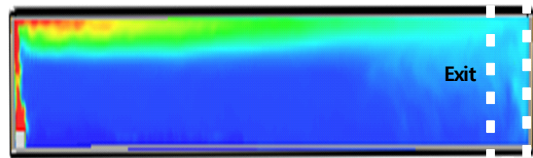
Content	Max. Temp.(°C)	Improvement rate (%)
None Draft Curtain	33.3	-
Draft Curtain 20 cm	33.3	-
Draft Curtain 30 cm	31.1	6.6
Draft Curtain 40 cm	27.0	18.9

<Table 5>에서 보는 바와 같이 가시거리는 5m 이상을 모든 시물레이션에서 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 5> Min. visibility according to Draft Curtain length

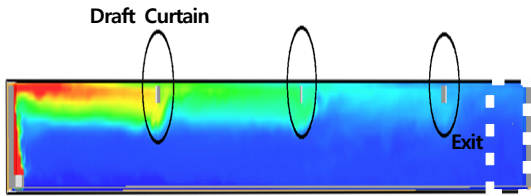
Content	Min. visibility(m)	Improvement rate(%)
None Draft Curtain	13.5	-
Draft Curtain 20cm	21.2	57.0
Draft Curtain 30cm	over 30	no influence
Draft Curtain 40cm	over 30	no influence

[Fig. 3]은 복도에 방화문이 없는 경우 온도 상승 및 연기 이동 정도를 나타낸 것이다.



[Fig. 3] Temperature distribution without draft curtain.

본 연구는 방화문과 제연경계벽이 화재 발생 시 연기와 온도 변화를 비교분석하는 것으로 그 영향이 가장 큰 40cm의 제연경계벽과 비교하고자 한다. 이때, [Fig. 4]는 제연경계벽이 40cm 설치된 상황의 시물레이션으로 온도 상승 및 연기 이동 정도를 알 수 있다. 특히, 측정점인 피난구 방향은 온도 상승 및 연기가 거의 없는 것을 확인할 수 있다.



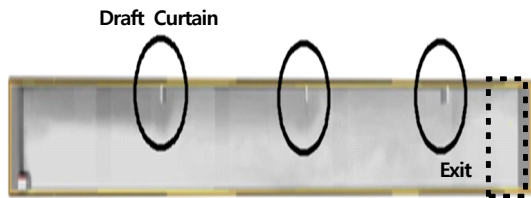
[Fig. 4] Temperature distribution with 40cm length draft curtain.

[Fig. 5]는 방화문이 개방된 상황의 매연농도 및 연기 이동을 나타낸 것이다.



[Fig. 5] Visibility distribution without draft curtain.

[Fig. 6]은 40cm의 제연경계벽이 설치된 상황의 연기 이동 정도를 나타낸 것으로 측정점인 피난구 방향은 연기가 거의 없음을 확인할 수 있다.

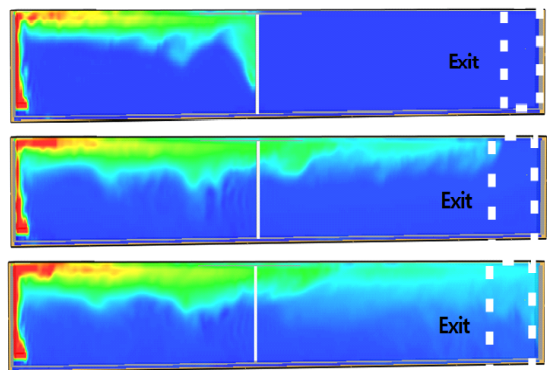


[Fig. 6] Visibility distribution with 40cm length draft curtain.

2. 방화문 설치

이 절은 실제 선박에 설치된 방화문을 고려하여 화재 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 분석한 것이다. 이때 모든 조건으로 시뮬레이션을 수행하는 것은 물리적으로 불가능하여 특정 조건하에서 시뮬레이션을 수행한다. 이때 실제 선박과 유사한 상황을 위해 방화문은 화재 발생을 알리는 경보기 작동 10초 후 방화문이 닫히도록 하였

다. 그리고 미처 탈출하지 못한 실습생 및 승무원이 방화문을 열고 탈출하는 경우를 가정하여 3초 간격으로 방화문이 개폐하도록 하였다. 방화문은 1개로 복도에 중앙 즉, 18.4m에 설치하였다. 시뮬레이션 결과 연기가 방화문에 최초로 도착한 시간은 23초로 나타났다. [Fig. 7]은 온도 변화를 나타낸 것으로 위로부터 연기가 방화문에 최초로 도착한 시간인 23초와 총 시뮬레이션 시간인 100초에서 50초 간격으로 분석한 것이다.



[Fig. 7] Temperature distribution of fire door (23, 50, 100sec).

[Fig. 8]은 가시거리 변화를 나타낸 것으로 연기가 방화문에 최초로 도착한 시간인 23초와 총 시뮬레이션 시간인 100초에서 50초 간격으로 분석한 것이다.



[Fig. 8] Visibility distribution of fire door (23, 50, 100sec).

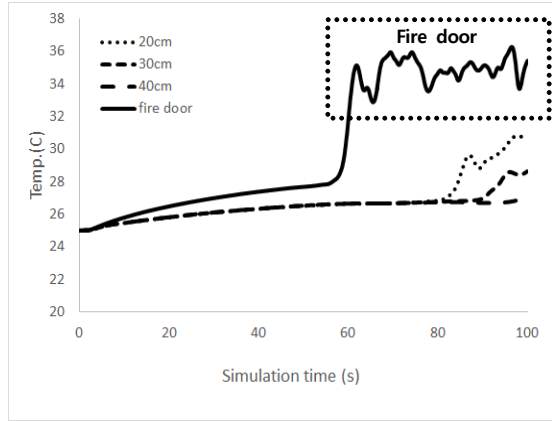
<Table 6>은 방화문 및 제연경계벽이 설치되지 않은 경우, 방화문이 설치된 경우 그리고 제연경계벽이 20, 30, 40cm로 설치된 경우 최대온도 및 최소 가시거리를 표로 정리한 것으로 온도의 경우는 모두 대피허용한계값인 60°C를 초과하지 않았지만 제연경계벽인 온도가 더 감소함을 확인할 수 있다. 특히, 가시거리의 경우는 확연한 차이가 나타났다. 본 연구에서는 목재화재에 화재의 크기를 100kW로 시뮬레이션한 것으로 유류화재나 더 큰 크기의 화재 발생 시 온도에도 영향이 있을 것으로 예상되며 다양한 종류의 화재 및 크기는 향후 지속연구가 필요할 것이다.

<Table 6> Comparison of temperature and visibility variation with time at measuring point length of draft curtain and fire door and none

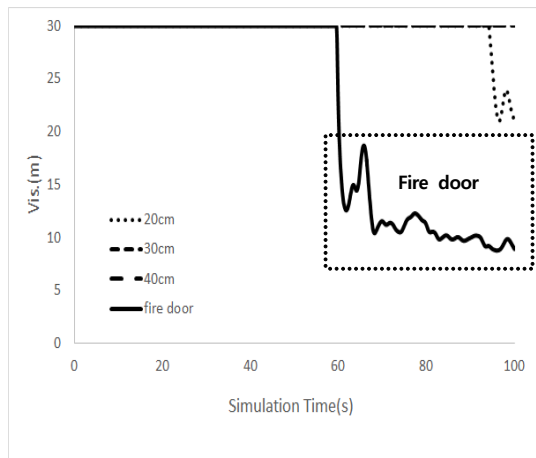
	None	Fire door	Draft curtain		
			20cm	30cm	40cm
Max. Temp.(°C)	33.3	36.3	33.3	31.1	27.0
Min. Vis.(m)	13.5	8.8	21.2	over 30	over 30

[Fig. 9]는 방화문과 제연경계벽 길이에 대한 온도분석 결과로 대피허용한계값인 60°C를 초과하지 않았지만 제연경계벽이 설치된 경우가 방화문의 경우보다 온도가 낮게 나타나 인명 안전에 상대적으로 안전한 것으로 나타났다.

[Fig. 10]은 가시거리 분석 결과를 그래프로 나타낸 것으로 초기에 30m에서 일정하게 유지하는 이유는 FDS 프로그램은 최대 가시거리이기 때문이다. 이때, 그래프에서 보는 바와 같이 방화문이 가시거리에서는 더 낮게 분석되어 인명 안전에 상대적으로 위험한 것으로 나타났다.



[Fig. 9] Comparison of temperature variation with time at measuring point length of draft curtain and fire door.



[Fig. 10] Comparison of visibility variation with time at measuring point length of draft curtain and fire door.

IV. 결론

본 연구에서 정한 물리적 조건 하에 화재 시뮬레이션을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- ① 온도 분석결과, 제연경계벽이 30cm일 경우는 제연경계벽이 없는 경우에 비해 2.2°C가 감소하여 온도 감소율이 6.6% 향상되었다. 또한,

40cm일 경우는 6.3℃가 감소하여 18.9%가 향상되었다.

- ② 가시거리 분석결과, 제연경계벽인 20cm인 경우에는 제연경계벽이 없는 경우에 비해 13.5m에서 21.2m로 57.0%가 향상되었다. 특히, 30cm 이상일 경우는 연기로 인한 가시거리 감소가 없는 것으로 나타났다.
- ③ 방화문과의 비교분석 결과, 온도 및 가시거리 측정 모두에서 제연경계벽 설치가 유효피난시간을 증가시킴을 알 수 있었다([Fig. 9] and [Fig. 10]).
- ④ 종합 분석결과, 본 연구에서 제안한 제연경계벽은 대피허용한계값 검증 요소인 온도감소율은 최대 18.9%, 가시거리 향상율은 최대 57.0% 로 인명 생존율 향상에 도움이 되는 것으로 확인되었다.

이미 밝힌 바와 같이 현재 설치된 방화문은 화재 확산뿐만 아니라 신속한 탈출 시에 사망의 대부분을 차지하는 연기 확산을 감소시키는데 큰 효과가 있다. 하지만 탈출을 완료하지 못한 방화문 안쪽에 위치한 승객 및 승무원들은 위험할 수 있기 때문에 본 연구는 이러한 인원들의 생존율을 향상을 위한 방법으로 제연경계벽 추가 설치를 제안함을 밝혀둔다. 향후, 제연경계벽의 간격과 길이를 서로 비교분석하여 경제적 결과를 도출하는 지속 연구가 필요할 것이다.

References

Baek DS and Lee SC(2016). Study of the Characteristics of Smoke Spread by an Installing Smoke Barrier in Medium Length Road Tunnel, *Fire Sci. Eng.*, 30(5), 9~17.
<https://doi.org/10.7731/KIFSE.2016.30.5.009>

Kim HW, Lee YS and Nam YJ(2021). A Study on the Characteristics of Smoke in the Depth of the Smoke Reservoir Screen in Large Volume Space, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*

Engineering, 33(2), 064~071.
<https://doi.org/10.6110/KJACR.2021.33.2.064>

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.
<http://dx.doi.org/10.13000/JFMSE.2016.28.5.1358>

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 Lee CH(2018). A Study on Improving the Efficiency of the Survival Rate for the Offshore Accommodation Barge Resident Using Fire Dynamic Simulation, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 21(6), 689~695.
<https://doi.org/10.7837/kosomes.2015.21.6.689>

Kwark JH(2006). Standardization of the Performance Test Procedure for Smoke Control System, *T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, 20(3), 21~28.

Korea Institute Of Nuclear Safety(2008). Development of Performance based Fire Hazard Analysis Method and Evaluation System(Evaluation of Fire Modeling), 19~20.

Korean Maritime Safety Tribunal(2018). Statistical annual reports from 2016 to 2020, Status of marine accidents' causes as per types and years, https://www.kmst.go.kr/eng/com/selectHtmlPage.dohtmlName=m4_vesseltype on Sep. 30.

McGrattan KB and Forney GP(2004). Fire dynamics simulator (Version 4) user's Guide, Technical reference guide. National Institute of Standards and Technology, NIST Special Publication 1018.

NLIC(2021). National Law Information Center, Ship Fire Protection Structure Standards, <http://www.law.go.kr> on Sep. 30.

NLIC(2021). National Law Information Center, NFSC 501, <http://www.law.go.kr> on Sep. 30.

NIST(2014). Fire Dynamics Simulator(Version 5) User's Manual, <http://fire.nist.gov/fds> on Sep. 30.

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.

Roh SK and Hur JH(2004). A Study on the Risk Assessment of the Underground Space-The Estimation of Smoke Reservoir Screen for Smoke Control in Subway Station Platform, T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., 18(4), 103~109.

-
- Received : 06 December, 2021
 - Revised : 07 January, 2022
 - Accepted : 17 January, 2022